



TUGAS AKHIR - TF 141581

**IMPLEMENTASI TEKNIK *MAXIMUM POWER POINT TRACKING* (MPPT) PADA SISTEM PENJEJAK MATAHARI BERBASIS *ADAPTIVE NEURO-FUZZY INFERENCE SYSTEM* (ANFIS)**

ADITYA ISMAN NUGRAHA  
NRP 2414 105 010

Dosen Pembimbing:  
Ir. Matradji, M.Sc.  
Dr. Imam Abadi, S.T., M.T.

DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2017





**FINAL PROJECT - TF 141581**

**IMPLEMENTATION OF MAXIMUM POWER  
POINT TRACKING (MPPT) TECHNIQUE ON  
SOLAR TRACKING SYSTEM BASED ON  
ADAPTIVE NEURO-FUZZY INFERENCE SYSTEM  
(ANFIS)**

**ADITYA ISMAN NUGRAHA**  
**NRP 2414 105 010**

**Supervisors:**  
**Ir. Matradji, M.Sc.**  
**Dr. Imam Abadi, S.T., M.T.**

**Engineering Physics Department**  
**Faculty of Industrial Technology**  
**Sepuluh Nopember Institute of Technology**  
**Surabaya 2017**



## LEMBAR PENGESAHAN

# IMPLEMENTASI *MAXIMUM POWER POINT TRACKING* (MPPT) PADA SISTEM PENJEJAK MATAHARI BERBASIS *ADAPTIVE NEURO-FUZZY INFERENCE* *SYSTEM* (ANFIS)

## TUGAS AKHIR

Oleh :

Aditya Isman Nugraha

NRP. 2414 105 010

Surabaya, Januari 2017

Mengetahui/Menyetujui

Pembimbing I,



Ir. Matradji, M.Sc.

NIP. 19560720 198503 1 003

Pembimbing II,



Dr. Imam Abadi, S.T., M.T.

NIP. 19761006 199903 1 002

Ketua Departemen  
Teknik Fisika FTI-ITS



Agus Muhamad Hatta, S.T., M.Si., Ph.D.

NIP. 19780902 200312 1 002

***“Halaman ini memang dikosongkan”***

**IMPLEMENTASI *MAXIMUM POWER POINT TRACKING*  
(MPPT) PADA SISTEM PENJEJAK MATAHARI  
BERBASIS *ADAPTIVE NEURO-FUZZY INFERENCE*  
SYSTEM (ANFIS)**



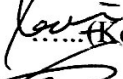

**TUGAS AKHIR**

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
pada  
Bidang Studi Rekayasa Instrumentasi dan Kontrol  
Program Studi S-1 Departemen Teknik Fisika  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

**Aditya Isman Nugraha**  
NRP. 2414 105 010

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Ir. Matradji, M.Sc.  .....(Pembimbing I)
2. Dr. Imam Abadi, S.T., M.T.  .....(Pembimbing II)
3. Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T.  .....(Ketua Penguji)
4. Dr. Ir. Purwadi Agus Darwito, M.Sc.  .....(Penguji I)

**SURABAYA  
JANUARI 2017**

***“Halaman ini memang dikosongkan”***



# **IMPLEMENTASI MAXIMUM POWER POINT TRACKING (MPPT) PADA SISTEM PENJEJAK MATAHARI BERBASIS ADAPTIVE NEURO-FUZZY INFERENCE SYSTEM (ANFIS)**

**Nama Mahasiswa** : Aditya Isman Nugraha  
**NRP** : 2414 105 010  
**Departemen** : Teknik Fisika FTI-ITS  
**Dosen Pembimbing** : Ir. Matradji, M.Sc.  
Dr. Imam Abadi, S.T., M.T.

## ***Abstrak***

Kendala utama pada sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) saat ini yaitu efisiensi konversi modul fotovoltaik yang masih cukup rendah. Salah satu cara untuk meningkatkan perolehan daya listrik dari modul fotovoltaik adalah melengkapi modul fotovoltaik dengan sistem penjejak matahari (*solar tracker*). Karakteristik dari sebuah sel fotovoltaik dinyatakan dengan kurva arus – tegangan (I-V). Terdapat suatu titik kerja pada kurva I-V dimana modul fotovoltaik dapat menghasilkan daya keluaran paling optimum yang dinamakan Maximum Power Point (MPP). Pelacakan MPP pada kurva I-V dikenal dengan istilah Maximum Power Point Tracking (MPPT). Pada penelitian ini telah berhasil dirancang MPPT berbasis *Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System* (ANFIS) yang diintegrasikan dengan sistem penjejak matahari untuk meningkatkan efisiensi konversi modul fotovoltaik. Sistem MPPT ANFIS yang telah dirancang terdiri dari sensor arus dan tegangan, konverter *buck-boost*, dan mikrokontroler Arduino MEGA 2560 sebagai kontroler. Beban yang digunakan adalah lampu 12V 10W dengan jumlah bervariasi dan disusun seri. Sistem penjejak matahari yang dilengkapi dengan MPPT ANFIS mampu meningkatkan daya keluaran modul fotovoltaik sebesar 26,69% relatif terhadap modul fotovoltaik sistem *fixed* pada penggunaan beban 3 lampu.

**Kata kunci** : fotovoltaik, MPPT, penjejak matahari, ANFIS

***“Halaman ini memang dikosongkan”***

# **IMPLEMENTATION OF *MAXIMUM POWER POINT TRACKING (MPPT)* ON SOLAR TRACKING SYSTEM BASED ON *ADAPTIVE NEURO-FUZZY INFERENCE SYSTEM (ANFIS)***

**Name** : Aditya Isman Nugraha  
**Student ID** : 2414 105 010  
**Department** : Teknik Fisika FTI-ITS  
**Supervisors** : Ir. Matradji, M.Sc.  
Dr. Imam Abadi, S.T., M.T.

## ***Abstract***

The main obstacle in Solar Power Generation System nowadays is low conversion efficiency of photovoltaic modules. One way to improve power production of photovoltaic modules is to install solar tracking system on photovoltaic module. Characteristics of a photovoltaic cell is expressed by the curve of the current versus voltage (I-V curve). There is a point on the I-V curve where photovoltaic modules produce maximum possible output power which is called Maximum Power Point (MPP). A technique to track MPP on the I-V curve is known as Maximum Power Point Tracking (MPPT). In this study, the MPPT has been successfully designed based on Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) and integrated with solar tracking system to improve the conversion efficiency of photovoltaic modules. The designed ANFIS MPPT system consists of current and voltage sensors, buck-boost converter, and Arduino MEGA 2560 microcontroller as a controller. Varying amounts of lamp with 12V 10W rating arranged in series is used as load. Solar tracking system which is equipped with MPPT ANFIS able to increase the output power of photovoltaic modules by 26.69% relative to the fixed system when 3 lamps is used as load.

***Keywords:*** photovoltaic, MPPT, solar tracker, ANFIS

***“Halaman ini memang dikosongkan”***

## KATA PENGANTAR

Syukur alhamdulillah dipanjatkan kehadiran Allah SWT karena berkat rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian Tugas Akhir dengan judul **“IMPLEMENTASI TEKNIK *MAXIMUM POWER POINT TRACKING* (MPPT) PADA SISTEM PENJEJAK MATAHARI BERBASIS *ADAPTIVE NEURO-FUZZY INFERENCE SYSTEM* (ANFIS)”**.

Penulis mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya kepada pihak-pihak yang telah berperan dalam penulisan ini, diantaranya:

1. Ibu Ihat Solihat dan Bapak Sukarman yang selalu memberi dukungan dan semangat kepada penulis
2. Adik-adik, Anita Ismarani Nurjanah, Agung Isman Nur Hakim, dan Akbar Isman Nur Hakim yang senantiasa memberikan semangat pada penulis untuk segera menyelesaikan penelitian.
3. Bapak Agus Muhammad Hatta, Ph.D selaku ketua Departemen Teknik Fisika FTI-ITS.
4. Bapak Ir. Matradji, M.Sc. dan bapak Dr. Imam Abadi, S.T., M.T. selaku pembimbing Tugas Akhir yang telah membina dan membimbing penulis dengan baik.
5. Bapak Dr. Ir. Totok Soehartanto, DEA selaku dosen wali yang telah memberikan dukungan moril kepada penulis.
6. Teman-teman S1 Lintas Jalur Teknik Fisika 2014 dan 2015 FTI-ITS yang banyak membantu secara moril kepada penulis.
7. Teman-teman kontrakan Keputih Gang 1D dan MI3 Surabaya yang bersedia menghibur dan mendukung penulis selama melakukan penelitian.
8. Serta seluruh pihak yang telah banyak membantu yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu.

Penulis menyadari bahwa penulisan laporan Tugas Akhir ini masih jauh dari sempurna. Untuk itu saran serta kritik yang membangun sangat diharapkan oleh penulis sebagai bentuk introspeksi. Semoga laporan ini dapat menjadi manfaat khususnya

bagi penulis dan umumnya bagi mahasiswa yang akan melaksanakan penelitian serupa.

Surabaya, Januari 2017

Penulis

## DAFTAR ISI

<b>LEMBAR PENGESAHAN.....</b>	<b>iii</b>
<b>ABSTRAK .....</b>	<b>vii</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>ix</b>
<b>KATA PENGANTAR .....</b>	<b>xi</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>xiii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR .....</b>	<b>xv</b>
<b>DAFTAR TABEL.....</b>	<b>xvii</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Perumusan Masalah .....	2
1.3 Batasan Masalah .....	2
1.4 Tujuan Tugas Akhir .....	3
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA .....</b>	<b>5</b>
2.1 Fotovoltaik .....	5
2.1.1 Karakteristik fotovoltaik .....	5
2.2 Maximum Power Point Tracking (MPPT).....	8
2.2.1 MPPT metode ANFIS.....	11
2.2.2 Open-voltage method.....	12
2.3 Konverter DC-DC .....	13
2.3.1 Jenis-jenis konverter DC-DC .....	13
2.4 Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) .....	15
2.5 Mikrokontroler Arduino Mega 2560.....	18
2.6 Sistem Penjejak Matahari.....	19
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....</b>	<b>21</b>
3.1 Diagram Alir .....	21
3.2 Diagram blok MPPT ANFIS.....	23
3.3 Spesifikasi Sistem .....	26
3.4 Pemodelan dan Simulasi Subsistem.....	27
3.4.1 Pemodelan dan Simulasi Modul Fotovoltaik .....	27
3.4.2 Pemodelan dan Simulasi Konverter DC-DC .....	29
3.5 Perancangan ANFIS.....	31
3.6 Rancangan simulasi MPPT berbasis ANFIS.....	37
3.7 Realisasi MPPT ANFIS .....	38

3.8	Pengambilan Data .....	41
-----	------------------------	----

## **BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN .....43**

4.1	Simulasi MPPT berbasis ANFIS .....	43
4.1.1	Simulasi penjejukan $V_{MPP}$ .....	44
4.1.2	Simulasi perbandingan daya output .....	45
4.2	Pengujian perangkat keras MPPT ANFIS .....	47
4.2.1	Pengujian sensor .....	47
4.2.2	Pengujian konverter buck-boost.....	48
4.3	Pengujian penjejukan $V_{MPP}$ MPPT ANFIS .....	50
4.4	Pengujian Sistem Tanpa Penjejak Matahari .....	51
4.4.1	Pengujian dengan beban 2 buah lampu. ....	51
4.4.2	Pengujian dengan beban 3 buah lampu. ....	53
4.4.3	Pengujian dengan beban 4 buah lampu. ....	56
4.5	Pengujian Sistem Dengan Penjejak Matahari .....	58
4.5.1	Pengujian MPPT ANFIS Pada Sistem Penjejak Matahari .....	58
4.5.2	Pengujian Sistem Penjejak Matahari MPPT ANFIS dan Sistem Fixed non-MPPT. ....	60

## **BAB V PENUTUP .....65**

5.1	Kesimpulan .....	65
5.2	Saran.....	65

## **DAFTAR PUSTAKA**

### **LAMPIRAN A**

### **LAMPIRAN B**

### **LAMPIRAN C**



## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1</b>	Rangkaian pengganti fotovoltaiak[4].....	6
<b>Gambar 2.2</b>	Pengaruh radiasi terhadap $I_{sc}$ pada suhu konstan. .	7
<b>Gambar 2.3</b>	Pengaruh suhu terhadap $V_{oc}$ pada radiasi konstan.	8
<b>Gambar 2.4</b>	Perubahan MPP akibat pengaruh kondisi klimatik	8
<b>Gambar 2.5</b>	Ilustrasi penjejakan MPP pada kurva I-V [5].	10
<b>Gambar 2.6</b>	Blok diagram sistem MPPT[6].	11
<b>Gambar 2.7</b>	Blok diagram MPPT ANFIS[10].	12
<b>Gambar 2.8</b>	Diagram alir <i>open-voltage method</i> [6].	13
<b>Gambar 2.9</b>	Konverter <i>buck</i> .	14
<b>Gambar 2.10</b>	Konverter <i>boost</i> .	14
<b>Gambar 2.11</b>	Konverter <i>buck-boost</i> .	15
<b>Gambar 2.12</b>	Sistem inferensi <i>fuzzy</i> Takagi-Sugeno-Kang.	16
<b>Gambar 2.13</b>	Arsitektur ANFIS.	16
<b>Gambar 2.14</b>	Sistem penjejak matahari modul fotovoltaiak.	20
<b>Gambar 3.1</b>	Diagram alir penelitian.	21
<b>Gambar 3.2</b>	Diagram blok MPPT ANFIS.	24
<b>Gambar 3.3</b>	Diagram blok kontroler MPPT ANFIS.	25
<b>Gambar 3.4</b>	Diagram blok konverter <i>buck-boost</i> .	25
<b>Gambar 3.5</b>	Pemodelan rangkaian modul fotovoltaiak untuk memperoleh kurva I-V dan P-V.	28
<b>Gambar 3.6</b>	Kurva I-V modul TN-20M hasil pemodelan pada STC.	28
<b>Gambar 3.7</b>	Kurva P-V modul TN-20M hasil pemodelan pada STC.	29
<b>Gambar 3.8</b>	Pemodelan rangkaian konverter <i>buck-boost</i> .	30
<b>Gambar 3.9</b>	Respon $V_{pv}$ terhadap perubahan step positif <i>duty cycle</i> .	31
<b>Gambar 3.10</b>	Struktur ANFIS.	32
<b>Gambar 3.11</b>	Fungsi keanggotaan untuk input error.	33
<b>Gambar 3.12</b>	Fungsi keanggotaan untuk input selisih error.	34
<b>Gambar 3.13</b>	Fungsi keanggotaan output.	35
<b>Gambar 3.14</b>	Simulasi MPPT ANFIS pada Simulink.	37
<b>Gambar 3.15</b>	Simulasi MPPT ANFIS pada PSIM.	38
<b>Gambar 3.16</b>	Realisasi perangkat keras MPPT ANFIS.	40

<b>Gambar 4.1</b>	Variasi radiasi matahari.....	43
<b>Gambar 4.2</b>	Variasi suhu panel.....	44
<b>Gambar 4.3</b>	Hasil penjejakkan $V_{MPP}$ MPPT ANFIS (atas: tegangan; bawah: <i>duty cycle</i> ).....	45
<b>Gambar 4.4</b>	Daya panel fotovoltaik hasil penjejakkan.....	46
<b>Gambar 4.5</b>	Hasil pengujian sensor arus INA219.....	48
<b>Gambar 4.6</b>	Hasil pengujian sensor tegangan INA219.....	48
<b>Gambar 4.7</b>	Pengujian penjejakkan $V_{MPP}$ oleh MPPT ANFIS..	51
<b>Gambar 4.8</b>	Perbandingan daya MPPT dan non-MPPT beban 2 lampu.....	53
<b>Gambar 4.9</b>	Perbandingan daya MPPT dan non-MPPT beban 4 lampu.....	55
<b>Gambar 4.10</b>	Perbandingan $P_{out}$ MPPT dan non-MPPT beban 4 lampu.....	57
<b>Gambar 4.11</b>	Perbandingan daya sistem penjejak matahari MPPT ANFIS dan <i>fixed</i> .....	60

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2.1</b>	Spesifikasi Arduino Mega 2560.....	19
<b>Tabel 3.1</b>	Spesifikasi modul fotovoltaik.....	26
<b>Tabel 3.2</b>	Spesifikasi konverter <i>buck-boost</i> [15].....	27
<b>Tabel 3.3</b>	Perbandingan parameter modul fotovoltaik pada kondisi STC.....	29
<b>Tabel 3.4</b>	Hasil simulasi konverter <i>buck-boost</i> . ....	30
<b>Tabel 3.5</b>	Basis aturan-aturan ( <i>rules</i> ). ....	36
<b>Tabel 3.6</b>	Spesifikasi sensor INA219. ....	39
<b>Tabel 3.7</b>	Spesifikasi konverter <i>buck-boost</i> . ....	39
<b>Tabel 3.8</b>	Spesifikasi Arduino MEGA 2560. ....	40
<b>Tabel 4.1</b>	Variasi kondisi klimatik saat simulasi.....	43
<b>Tabel 4.2</b>	Nilai $V_{OC}$ dan $V_{MPP}$ .....	44
<b>Tabel 4.3</b>	Perbandingan $P_{MPP}$ dan $P_{MPPT}$ . ....	47
<b>Tabel 4.4</b>	Perbandingan tegangan keluaran konverter <i>buck-boost</i> .....	49
<b>Tabel 4.5</b>	Efisiensi konverter <i>buck-boost</i> .....	50
<b>Tabel 4.6</b>	Perbandingan daya output beban 2 lampu.....	52
<b>Tabel 4.7</b>	Perbandingan daya output beban 3 lampu.....	54
<b>Tabel 4.8</b>	Perbandingan daya output beban 4 lampu.....	56
<b>Tabel 4.9</b>	Perbandingan daya pada sistem penjejak matahari pukul 09.30.....	58
<b>Tabel 4.10</b>	Perbandingan daya pada sistem penjejak matahari pukul 11.30.....	59
<b>Tabel 4.11</b>	Perbandingan daya pada sistem penjejak matahari pukul 14.00.....	59
<b>Tabel 4.12</b>	Rata-rata peningkatan daya MPPT vs non-MPPT pada penjejak matahari.....	59
<b>Tabel 4.13</b>	Perbandingan daya sistem penjejak matahari MPPT ANFIS dan <i>fixed</i> non-MPPT.....	61

***“Halaman ini memang dikosongkan”***

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Indonesia sebagai negara yang berada di garis khatulistiwa memiliki potensi yang sangat besar dalam hal pemanfaatan sumber energi terbarukan berupa energi surya. Wilayah sebelah barat Indonesia terpapar energi surya sekitar  $4,5 \text{ kWh/m}^2/\text{hari}$  dengan deviasi bulanan sebesar 10%. Sedangkan untuk wilayah Indonesia sebelah timur memiliki paparan energi surya hingga  $5,1 \text{ kWh/m}^2/\text{hari}$  dengan deviasi bulanan sekitar 9%[1]. Fakta tersebut menunjukkan bahwa pemanfaatan energi surya yang berlimpah dan terbarukan dapat menjadikan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) sebagai alternatif yang prospektif guna memenuhi kebutuhan listrik di Indonesia khususnya di daerah terpencil.

Pada PLTS terdapat modul fotovoltaik sebagai perangkat utama untuk mengubah energi surya menjadi energi listrik. Salah satu kendala utama pada PLTS yaitu efisiensi konversi modul fotovoltaik yang masih cukup rendah sehingga dibutuhkan luasan area PLTS yang besar untuk mencukupi daya yang diinginkan. Konfigurasi modul fotovoltaik diusahakan untuk selalu mengeluarkan daya yang optimum agar efisiensinya tidak semakin berkurang[2]. Salah satu cara untuk meningkatkan perolehan daya dari modul fotovoltaik adalah melengkapi modul fotovoltaik dengan sistem penjejak matahari (*solar tracker*). Sistem penjejak matahari memastikan modul fotovoltaik dapat bergerak mengikuti pergerakan matahari pada waktu tertentu sedemikian rupa agar modul fotovoltaik selalu terpapar radiasi matahari secara maksimal sehingga daya yang dihasilkan menjadi optimal. Daya listrik yang dihasilkan oleh modul fotovoltaik yang dilengkapi oleh sistem penjejak matahari meningkat hingga 30% relatif terhadap modul fotovoltaik *fixed*[3].

Karakteristik dari sebuah sel fotovoltaik dinyatakan dengan kurva arus – tegangan (I-V) dan daya-tegangan (P-V). Terdapat suatu titik kerja pada kurva I-V atau kurva P-V dimana modul fotovoltaik bekerja pada efisiensi maksimum dan menghasilkan

daya keluaran paling optimum. Titik ini dinamakan *Maximum Power Point* (MPP). Bentuk kurva I-V, P-V, dan lokasi MPP dipengaruhi oleh tingkat radiasi matahari dan temperatur kerja modul fotovoltaiik.

Pelacakan MPP pada kurva I-V dimana daya yang dihasilkan mencapai puncaknya dikenal dengan istilah *Maximum Power Point Tracking* (MPPT). Konverter DC-DC digunakan untuk menghubungkan modul fotovoltaiik dengan beban. MPPT akan melakukan variasi *duty cycle* pada konverter DC-DC agar modul fotovltaiik bekerja pada kondisi MPP sedemikian rupa sehingga daya optimum dapat dihantarkan menuju beban. Terdapat berbagai macam metode MPPT yang telah dikembangkan. Metode MPPT tersebut dapat diklasifikan menjadi metode berdasarkan pengaturan *load line* pada kurva I-V dan metode berdasarkan kecerdasan buatan. Pada penelitian ini dirancang sebuah MPPT berdasarkan kecerdasan buatan *hybrid* dengan metode *Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System* (ANFIS) yang diintegrasikan dengan sistem penjejak matahari untuk meningkatkan perolehan daya listrik dari modul fotovoltaiik.

## 1.2 Perumusan Masalah

Adapun perumusan masalah pada penelitian ini adalah

1. Bagaimana merancang dan menerapkan MPPT berbasis ANFIS pada sistem penjejak matahari?
2. Bagaimana peningkatan daya modul fotovotolaik yang diperoleh oleh sistem MPPT berbasis ANFIS?

## 1.3 Batasan Masalah

Untuk memfokuskan penyelesaian masalah pada penelitian tugas akhir ini maka batasan masalah yang diangkat adalah sebagai berikut :

1. MPPT yang dirancang berbasis kecerdasan buatan dengan metode *Adaptive-Neuro Fuzzy Inference System* (ANFIS).
2. Panel surya yang digunakan adalah panel surya dengan daya nominal 20 Wp.
3. Menggunakan konverter *buck-boost* sebagai *interface* antara modul fotovoltaiik dan beban.

4. Faktor-faktor yang mempengaruhi karakteristik panel surya dibatasi hanya pada radiasi matahari dan suhu modul fotovoltaik.
5. Penelitian tidak membahas tentang kontrol pada sistem penjejak matahari.
6. Penelitian tidak membahas mengenai kontrol tegangan dan arus pengisian pada baterai.
7. *Power supply* untuk komponen elektronik diambil dari sumber daya eksternal (*external power source*).

#### **1.4 Tujuan Tugas Akhir**

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Merancang dan menerapkan MPPT berbasis ANFIS pada sistem penjejak matahari.
2. Mendapatkan peningkatan daya keluaran fotovoltaik dengan sistem MPPT berbasis ANFIS.

***“Halaman ini memang dikosongkan”***



## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Fotovoltaik

Sel fotovoltaik merupakan elemen semikonduktor yang memanfaatkan efek fotovoltaik untuk mengubah energi surya menjadi energi listrik tanpa elemen mekanis dan tanpa penggunaan bahan bakar. Cara kerja sel fotovoltaik identik dengan piranti semikonduktor dioda. Foton-foton yang merupakan partikel cahaya mengenai sel surya dan menabrak elektron. Ketika energi foton tersebut cukup maka elektron akan didorong keluar dari pita valensi (*valence band*) melewati pita pemisah (*band gap*) menuju pita konduksi (*conduction band*). Perbedaan tegangan pada terminal sel fotovoltaik akan menyebabkan elektron pada pita konduksi bergerak. Elektron yang bergerak inilah yang disebut sebagai arus listrik.

##### 2.1.1 Karakteristik fotovoltaik

Persamaan umum keluaran arus listrik dari fotovoltaik adalah sebagai berikut [4]:

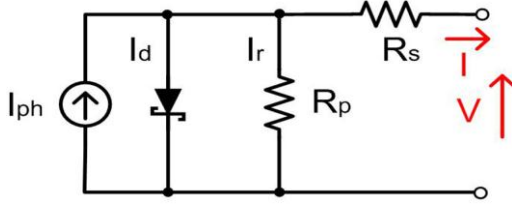
$$I = I_{pv} - I_o \left\{ \exp \left[ \frac{V + IR_s}{aV_t} \right] - 1 \right\} - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (2.1)$$

$$V_t = \frac{N_s k T}{q} \quad (2.2)$$

dimana :

- $I_{pv}$  adalah arus fotovoltaik (A),
- $I_o$  adalah arus saturasi dari dioda (A),
- $q$  adalah muatan elektron ( $1,602 \times 10^{-19}$  C),
- $I$  adalah arus pada terminal fotovoltaik (A),
- $V$  adalah tegangan pada terminal fotovoltaik (V),
- $V_t$  adalah tegangan termal *array*,
- $k$  adalah konstanta Boltzman ( $1,381 \times 10^{-23}$  J/K),
- $T$  adalah suhu sambungan p-n dalam Kelvin (K),
- $a$  adalah faktor idealitas dari dioda,

$R_s$  adalah resistansi seri ekuivalen *array* fotovoltaiik (Ohm),  
 $R_p$  adalah resistansi paralel ekuivalen *array* fotovoltaiik (Ohm),  
 $N_s$  adalah jumlah sel fotovoltaiik terhubung seri.



**Gambar 2.1** Rangkaian pengganti fotovoltaiik[4].

Apabila diasumsikan bahwa sel fotovoltaiik tidak memiliki rugi-rugi internal yaitu apabila dianggap nilai  $R_s$  sangat kecil dan nilai  $R_p$  sangat besar, maka persamaan (2.1) menjadi

$$I = I_{pv} - I_o \left\{ \exp \left[ \frac{V}{aV_t} \right] - 1 \right\} \quad (2.3)$$

Adapun karakteristik besarnya daya yang dapat dikeluarkan oleh sel fotovoltaiik bergantung pada besarnya intensitas cahaya matahari yang mengenai permukaan sel fotovoltaiik dan suhu pada permukaan sel fotovoltaiik. Dari persamaan (2.1), arus yang dibangkitkan oleh foton,  $I_{ph}$ , berhubungan dengan radiasi matahari,  $\lambda$  dan suhu  $T$  yaitu sebagai berikut

$$I_{pv} = [I_{pv,n} + K_I(T - 298)] \frac{\lambda}{1000} \quad (2.4)$$

dimana  $K_I$  adalah koefisien suhu arus hubung singkat (A/K),  $I_{pv,n}$  adalah arus fotovoltaiik pada *Standard Test Condition* (STC) yaitu suhu 25°C atau 298 Kelvin dan radiasi 1000 W/m<sup>2</sup>,  $T$  adalah suhu sel dalam Kelvin, dan  $\lambda$  adalah radiasi matahari dalam W/m<sup>2</sup>.

Untuk mencari nilai arus saturasi dari dioda,  $I_o$ , digunakan persamaan berikut

$$I_o = I_{o,n} \left[ \frac{T}{T_n} \right]^3 \exp \left[ \left( \frac{1}{T_n} - \frac{1}{T} \right) \frac{qE_g}{ak} \right] \quad (2.5)$$

dimana  $I_{o,n}$  arus saturasi nominal dalam (A),  $T$  adalah suhu kerja

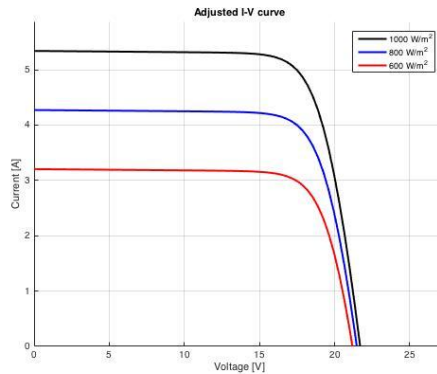
sel (K),  $T_r$  adalah suhu referensi sel (STC, 298 K), dan  $E_g$  adalah energi band gap dari semikonduktor.

Arus saturasi nominal  $I_{0,n}$  dapat diperoleh melalui persamaan berikut

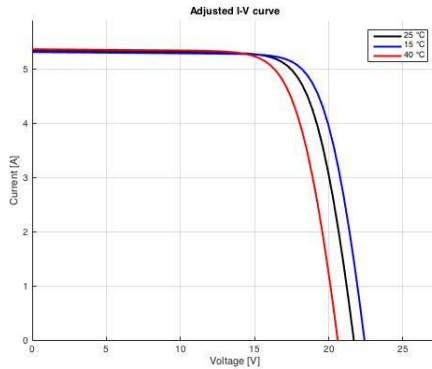
$$I_{o,n} = \frac{I_{sc,n}}{\exp\left(\frac{V_{oc,n}}{aV_{t,n}}\right) - 1} \quad (2.6)$$

dimana  $I_{SC,n}$  adalah arus hubung singkat sel pada kondisi STC,  $V_{OC,n}$  adalah tegangan rangkaian terbuka sel pada kondisi STC dan  $V_{t,n}$  adalah tegangan termal sel terkoneksi seri sebanyak  $N_s$  pada kondisi STC.

Arus yang dihasilkan sel fotovoltaik dominan dipengaruhi oleh besarnya radiasi matahari. Berdasarkan persamaan (2.4) dapat diketahui bahwa semakin tinggi nilai radiasi matahari maka arus hubung singkat sel fotovoltaik  $I_{SC}$  juga semakin meningkat. Di sisi lain, suhu sel akan mempengaruhi tegangan rangkaian terbuka  $V_{OC}$ . Semakin tinggi suhu maka  $V_{OC}$  akan semakin rendah. Ilustrasi pengaruh radiasi matahari dan suhu terhadap karakteristik kurva I-V modul fotovoltaik ditampilkan pada Gambar 2.2 dan Gambar 2.3 secara berurutan.



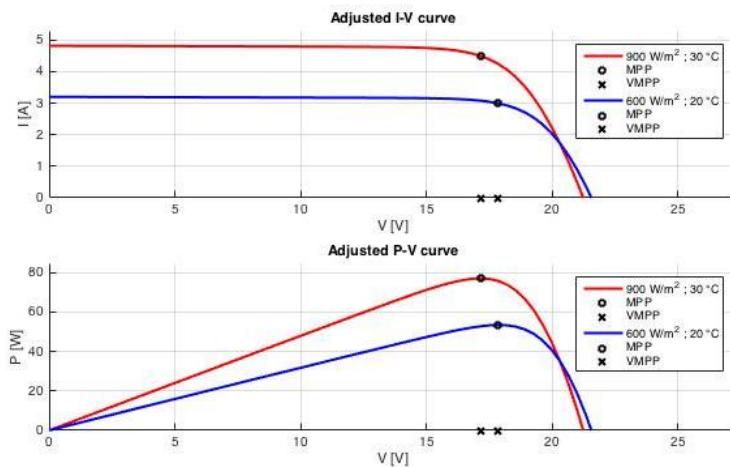
**Gambar 2.2** Pengaruh radiasi terhadap  $I_{SC}$  pada suhu konstan.



**Gambar 2.3** Pengaruh suhu terhadap  $V_{OC}$  pada radiasi konstan.

## 2.2 Maximum Power Point Tracking (MPPT)

*Maximum power point tracking* atau MPPT adalah metode penjejakan untuk memperoleh daya maksimum yang mungkin (*maximum possible power*) dari modul fotovoltaik pada kondisi lingkungan tertentu.



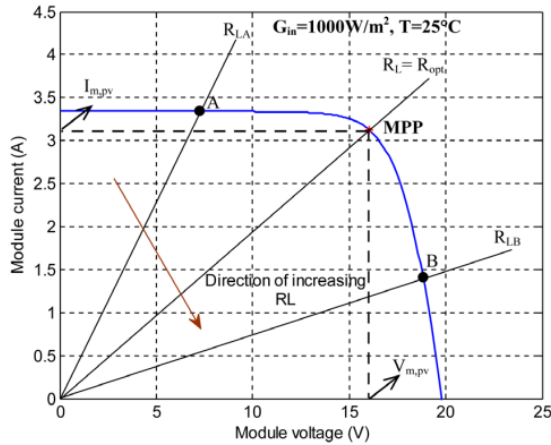
**Gambar 2.4** Perubahan MPP akibat pengaruh kondisi iklim

Telah dijelaskan sebelumnya bahwa kinerja panel fotovoltaik dalam menghasilkan daya listrik sangat oleh kondisi

klimatik. Pada kondisi klimatik tertentu, panel fotovoltaik akan menghasilkan daya maksimum yang mungkin apabila berada pada kondisi titik daya maksimum (*maximum power point*/MPP). Lokasi titik daya maksimum pada kurva I-V suatu panel fotovoltaik selalu berubah seiring perubahan radiasi matahari dan suhu kerja sel. Ilustrasi perubahan titik kerja maksimum dapat dilihat pada Gambar 2.4. Nilai MPP perlu dilacak dengan sebuah algoritma penjejakan menggunakan MPPT apabila panel fotovoltaik diinginkan menghasilkan daya maksimum. Tujuan utama dari MPPT adalah mencocokkan resistansi ekuivalen terminal panel fotovoltaik  $R_{eq}$  dengan resistansi keluaran optimal panel fotovoltaik  $R_{opt}$  yang didefinisikan sebagai berikut[5]

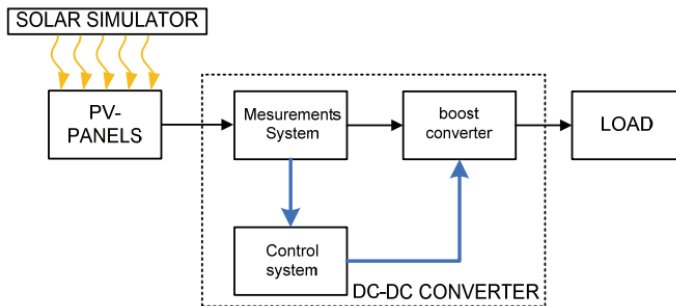
$$R_{opt} = \frac{V_{mpp}}{I_{mpp}} \quad (2.7)$$

Saat kondisi  $R_{eq} = R_{opt}$ , kondisi MPP tercapai dan panel fotovoltaik akan menghasilkan daya maksimum yang mungkin. Ilustrasi proses penjejakan nilai  $R_{eq}$  menuju  $R_{opt}$  untuk mencapai kondisi MPP dapat dilihat pada Gambar 2.5. Garis linear dengan kemiringan tertentu merupakan representasi nilai  $R_{eq}$ . Saat kondisi *short-circuit* nilai  $R_{eq} = 0$  dan saat kondisi *open-circuit* nilai  $R_{eq} = \infty$ . Perpotongan antara garis  $R_{eq}$  dan kurva I-V merupakan titik kerja panel fotovoltaik. Nilai  $R_{eq}$  perlu diubah sedemikian rupa sehingga perpotongan ini terjadi pada titik kerja maksimum (MPP).



**Gambar 2.5** Ilustrasi penjejakan MPP pada kurva I-V [5].

MPPT pada umumnya terdiri dari konverter DC-DC, *controller*, dan sensor. Konverter DC-DC merupakan penghubung antara panel fotovoltaik dengan beban utama (baterai ataupun perangkat elektronik lain). Pada sistem MPPT, konverter DC-DC mempunyai peran untuk mengubah-ubah nilai  $R_{eq}$  berdasarkan nilai *duty cycle* yang diterima. Untuk menentukan nilai *duty cycle* yang tepat sedemikian rupa sehingga nilai  $R_{eq} = R_{opt}$  maka digunakan sebuah *controller* yang telah dilengkapi dengan algoritma penjejakan MPP. Untuk menentukan nilai *duty cycle* yang tepat, algoritma penjejakan memerlukan masukan informasi dari sensor. Informasi yang diperlukan dapat berupa arus, tegangan, dan daya panel fotovoltaik ataupun kondisi iklim seperti temperatur dan radiasi matahari.



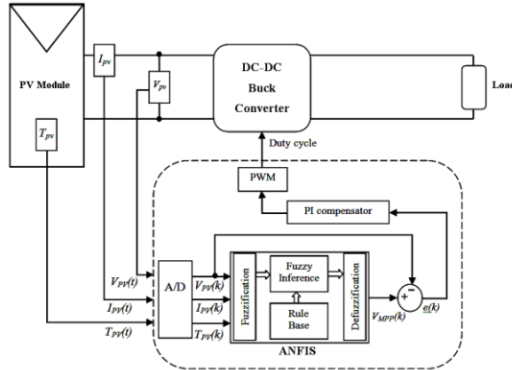
**Gambar 2.6** Blok diagram sistem MPPT[6].

Terdapat berbagai macam metode MPPT yang telah dikembangkan. Metode MPPT tersebut dapat diklasifikasikan menjadi metode berdasarkan pengaturan *load line* pada kurva I-V dan metode berdasarkan kecerdasan buatan[7]. Metode MPPT Perturb and Observe (P&O) dan Incremental Conductance merupakan contoh metode MPPT berdasarkan pengaturan *load line* kurva I-V. Metode MPPT berdasarkan kecerdasan buatan dapat berupa *Fuzzy Logic*, *Artificial Neural Network*, dan *Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System* (ANFIS). Sistem MPPT berbasis kecerdasan buatan memiliki kemampuan yang andal dalam menghadapi ketidakpastian akibat perubahan kondisi iklim dan kondisi beban[7]. Selain itu terdapat pula metode *open-voltage method* dan *short-current method* yang menyatakan bahwa *maximum power point* (MPP) adalah proporsional terhadap nilai tegangan rangkaian terbuka  $V_{OC}$  dan arus hubung singkat  $I_{SC}$ [6].

### 2.2.1 MPPT metode ANFIS

MPPT dengan metode ANFIS membutuhkan kombinasi beberapa informasi dari sensor agar mampu melakukan penjejakan MPP. MPPT ANFIS mampu melakukan penjejakan MPP dengan baik setelah dilatih menggunakan sejumlah pasangan data input-output. Pasangan data input-output yang digunakan dapat berupa input kondisi iklim (radiasi matahari dan suhu panel) dan output berupa arus  $I_{MPP}$ [9]. Pada penelitian lainnya, data input berupa kombinasi kondisi iklim dan besaran fisis keluaran panel

fotovoltaik (suhu panel, tegangan dan arus) dan output berupa tegangan  $V_{MPP}$ [10]. Nilai output ANFIS ( $V_{MPP}/I_{MPP}$ ) kemudian diumpangkan pada kontroler PI (*Proportional-Integral*) yang akan menghasilkan *duty cycle* sedemikian rupa sehingga kondisi MPP dapat tercapai.



**Gambar 2.7** Blok diagram MPPT ANFIS[10].

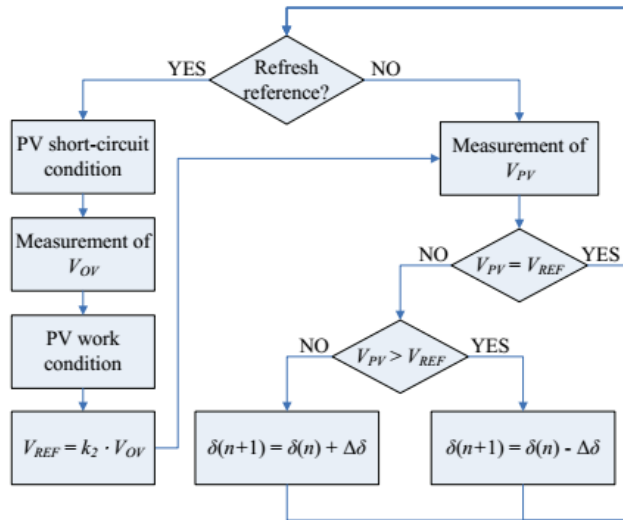
### 2.2.2 *Open-voltage method*

*Open-voltage method* atau metode tegangan rangkaian terbuka menganggap bahwa tegangan  $V_{MPP}$  mempunyai rasio hampir konstan terhadap tegangan rangkaian terbuka  $V_{OC}$ [6] atau dapat dinyatakan sebagai

$$\frac{V_{mpp}}{V_{oc}} \cong k ; k < 1 \quad (2.8)$$

dengan nilai  $k$  berkisar  $0.7 - 0.8$ [11]. Metode ini membutuhkan pengukuran  $V_{OC}$  secara berkala agar diperoleh perkiraan nilai  $V_{MPP}$  yang relatif tepat sesuai dengan kondisi iklim yang berubah-ubah. Setelah  $V_{MPP}$  diperkirakan, kontroler melakukan regulasi sedemikian rupa hingga kondisi MPP tercapai. Diagram alir *open-voltage method* ditampilkan pada Gambar 2.8.





**Gambar 2.8** Diagram alir *open-voltage method*[6].

## 2.3 Konverter DC-DC

Konverter DC-DC adalah sirkuit elektronik yang berfungsi untuk mengubah tegangan searah (DC) ke tegangan DC dengan level berbeda. Konverter DC-DC digunakan untuk menghubungkan modul fotovoltaik dengan beban dan *duty cycle* pada konverter digunakan untuk mengubah beban ekuivalen yang dirasakan oleh sumber (modul fotovoltaik) sehingga daya maksimum dapat ditransfer dari modul menuju beban. Berdasarkan hal tersebut, konverter DC-DC dapat diibaratkan sebagai tahanan variabel pada terminal modul fotovoltaik yang diatur berdasarkan *duty cycle*.

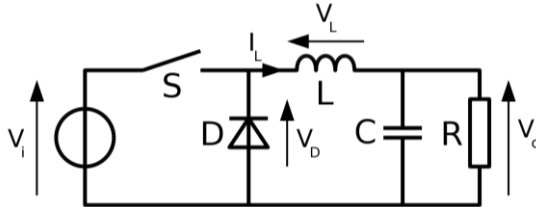
### 2.3.1 Jenis-jenis konverter DC-DC

#### A. Konverter *buck*

Konverter *Buck* dapat menghasilkan tegangan output lebih rendah daripada tegangan input. Konverter dapat disebut sebagai konverter DC-DC *step down*. Nilai tegangan keluaran diatur berdasarkan *duty cycle* konverter. Hubungan antara tegangan input

$V_i$ , tegangan output  $V_o$ , dan *duty cycle*  $D$  untuk konverter *buck* adalah

$$V_o = DV_i \quad (2.9)$$

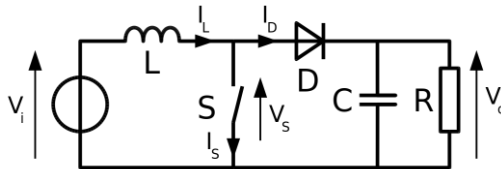


**Gambar 2.9** Konverter *buck*.

### B. Konverter *boost*

Konverter *boost* dapat menghasilkan tegangan output lebih tinggi daripada tegangan input. Konverter dapat disebut sebagai konverter DC-DC *step up*. Sama halnya dengan konverter *buck*. Nilai tegangan keluaran diatur berdasarkan *duty cycle* konverter. Hubungan antara tegangan input  $V_i$ , tegangan output  $V_o$ , dan *duty cycle*  $D$  untuk konverter *boost* adalah

$$V_o = \frac{1}{1 - D} V_i \quad (2.10)$$



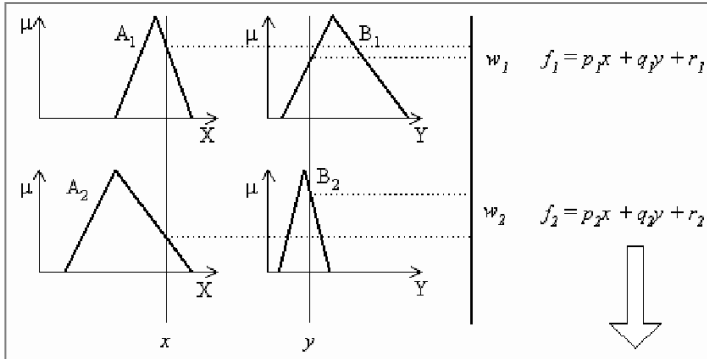
**Gambar 2.10** Konverter *boost*.

### C. Konverter *buck-boost*

Konverter *buck-boost* dapat menghasilkan tegangan output lebih rendah maupun lebih tinggi daripada tegangan input. Polaritas tegangan output akan berkebalikan dengan tegangan input (*negative polarity*). Konverter ini beroperasi berdasarkan transfer energi induktif. Hubungan tegangan input  $V_i$ , tegangan



**Input:**  $x$  and  $y$   
**Consequent:**  $f$

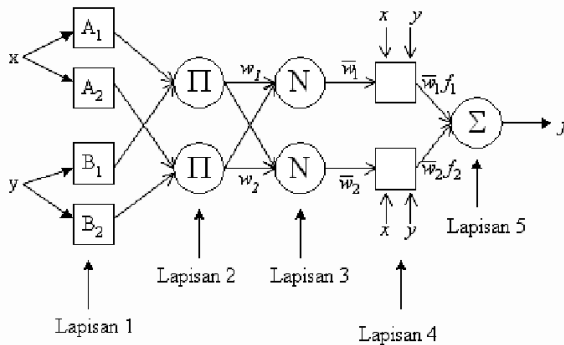


**Gambar 2.12** Sistem inferensi *fuzzy* Takagi-Sugeno-Kang.

Keluaran *fuzzy* dapat dibuat dalam bentuk persamaan sebagai berikut:

$$f = \frac{w_1 f_1 + w_2 f_2}{w_1 + w_2} = \bar{w}_1 f_1 + \bar{w}_2 f_2 \quad (2.12)$$

Struktur ANFIS yang menggambarkan sistem fuzzy Tagaki-Sugeno-Kang (TSK) seperti di atas bisa digambarkan dalam diagram blok atau disebut arsitektur jaringan syaraf *feedforward* seperti pada Gambar 2.13.



**Gambar 2.13** Arsitektur ANFIS.

Pada Gambar 2.13 terlihat sistem *neuro-fuzzy* terdiri atas lima lapisan dengan fungsi yang berbeda untuk tiap lapisannya. Tiap lapisan terdiri atas beberapa simpul yang dilambangkan dengan kotak atau lingkaran. Lambang kotak menyatakan simpul adaptif artinya nilai parameternya bisa berubah dengan pembelajaran dan lambang lingkaran menyatakan simpul nonadaptif yang nilainya tetap. Penjelasan lebih lengkap dapat dijabarkan sebagai berikut:

**Lapisan 1.** Pada lapisan pertama ini, merupakan lapisan yang terdiri dari simpul-simpul *adaptif* atau nilai yang dapat berubah-ubah. Pada struktur ANFIS lapisan ini biasanya merupakan derajat keanggotaan ( $\mu_i$ ) dari *fuzzy set*. Fungsi simpul adalah sebagai berikut

$$\begin{aligned} O_{1,i} &= \mu_{A_i}(x), & \text{untuk } i = 1, 2 \text{ atau} \\ O_{1,i} &= \mu_{B_{i-2}}(x), & \text{untuk } i = 3, 4 \end{aligned} \quad (2.13)$$

Simpul  $O_{1,i}$  menyatakan derajat keanggotaan  $\mu(x)$  dari setiap masukan terhadap himpunan *fuzzy* A dan B. Salah satu contoh fungsi keanggotaan yang digunakan adalah jenis gbell (*generalized bell*) yaitu

$$gbell(x, a, b, c) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x-c}{a} \right|^{2b}} \quad (2.14)$$

Untuk fungsi keanggotaan *generalized bell* di atas, parameter a, b, dan c merupakan parameter premis adaptif yang akan berubah-ubah selama proses pembelajaran. Parameter premis adaptif ini akan berbeda-beda tergantung dengan jenis fungsi keanggotaan yang dipilih.

**Lapisan 2.** Pada lapisan ini, semua simpul adalah parameter-parameter tetap (nonadaptif). Simpul ini berguna untuk mengalikan setiap input yang masuk. Fungsi simpul yang digunakan berupa

$$O_{2,i} = w_i = \mu_{A_i}(x) \cdot \mu_{B_{i-2}}(x) \quad \text{untuk } i = 1, 2 \quad (2.15)$$

Output dari simpul ini menyatakan derajat pengaktifan untuk setiap *fuzzy rule*. Fungsi ini dapat diperlukan apabila jumlah fungsi premis lebih dari dua himpunan *fuzzy*.

**Lapisan 3.** Simpul ini merupakan simpul nonadaptif yang dapat menampilkan fungsi derajat pengaktifan ternormalisasi yaitu perbandingan antara keluaran simpul ke-*i* pada lapisan sebelumnya terhadap seluruh keluaran lapisan sebelumnya. Fungsi yang digunakan yaitu

$$O_{3,i} = \bar{w} = \frac{w_i}{w_1 + w_2}, \quad i = 1,2 \quad (2.16)$$

**Lapisan 4.** Simpul pada lapisan ini adalah adaptif dengan derajat pengaktifan ternormalisasi yang berasal dari lapisan sebelumnya. Fungsi simpul lapisan ini adalah

$$O_{4,i} = \bar{w}_i \cdot f_i = \bar{w}_i(p_i x + q_i y + r_i) \quad (2.17)$$

Parameter *p*, *q*, dan *r* adalah parameter konsekuen adaptif berdasarkan keluaran dari lapisan sebelumnya.

**Lapisan 5.** Simpul nonadaptif pada lapisan ini menjumlahkan seluruh keluaran dari simpul-simpul pada lapisan sebelumnya dan menghasilkan satu simpul keluaran dengan fungsi simpul sebagai berikut

$$O_{5,i} = \sum \bar{w}_i \cdot f_i = \frac{\sum (w_i f_i)}{\sum w_i} \quad (2.18)$$

Kelima lapisan ini ekuivalen dengan sistem inferensi Fuzzy Takagi-Sugeno.

## 2.5 Mikrokontroler Arduino Mega 2560

Arduino Mega 2560 adalah sebuah papan mikrokontroler berbasis ATmega2560. Mikrokontroler ini memiliki 54 input/output digital (15 diantaranya dapat digunakan sebagai output PWM), 16 input analog, 4 UART, sebuah osilator kristal 16 MHz, sebuah koneksi USB, sebuah *power jack*, sebuah ICSP header, dan sebuah tombol reset. Arduino Mega dapat beroperasi

dengan daya eksternal 6-20 volt. ATmega2560 memiliki *flash memory* sebesar 256 KB untuk menyimpan kode (8 KB digunakan sebagai *bootloader*), SRAM sebesar 8 KB, dan EEPROM sebesar 8 KB. Analog input pada Arduino Mega 2560 memiliki resolusi 10 bit (1024 nilai) dan mampu mengukur tegangan sebesar 0-5 volt.

Pemrograman pada mikontroler ini dapat menggunakan Arduino IDE. ATmega2560 yang terdapat pada Arduino Mega memiliki *bootloader preprogrammed* sehingga tidak diperlukan programmer eksternal ketika akan mengunggah kode. Spesifikasi teknis Arduino Mega 2560 secara lebih lengkap ditampilkan pada Tabel 2.1.

**Tabel 2.1** Spesifikasi Arduino Mega 2560.

<b>Mikrokontroler</b>	ATmega2560
<b>Tegangan Operasi</b>	5 V
<b>Tegangan Input (rekomendasi)</b>	7-12 V
<b>Tegangan Input (limit)</b>	6-20 V
<b>Jumlah Pin Digital I/O</b>	54 (15 sebagai PWM)
<b>Jumlah Pin Analog</b>	16
<b>Arus DC setiap pin I/O</b>	20 mA
<b>Arus DC untuk pin 3.3V</b>	50 mA
<b>Flash Memory</b>	256 KB (8KB digunakan untuk bootloader)
<b>SRAM</b>	8 KB
<b>EEPROM</b>	4 KB
<b>Kecepatan Clock</b>	16 MHz
<b>LED_BUILTIN</b>	13
<b>Panjang</b>	101.52 mm
<b>Lebar</b>	53.3 mm
<b>Berat</b>	37 g

## 2.6 Sistem Penjejak Matahari

Sistem penjejak matahari merupakan sistem yang mampu mengikuti arah pergerakan matahari. Karena kemampuannya tersebut, saat ini sistem penjejak matahari banyak diaplikasikan

pada PLTS. Penggunaan penjejak matahari dimaksudkan untuk mengurangi sudut datang antara cahaya matahari dengan modul fotovoltaik sehingga daya listrik yang dihasilkan dapat dimaksimalkan.



**Gambar 2.14** Sistem penjejak matahari modul fotovoltaik.

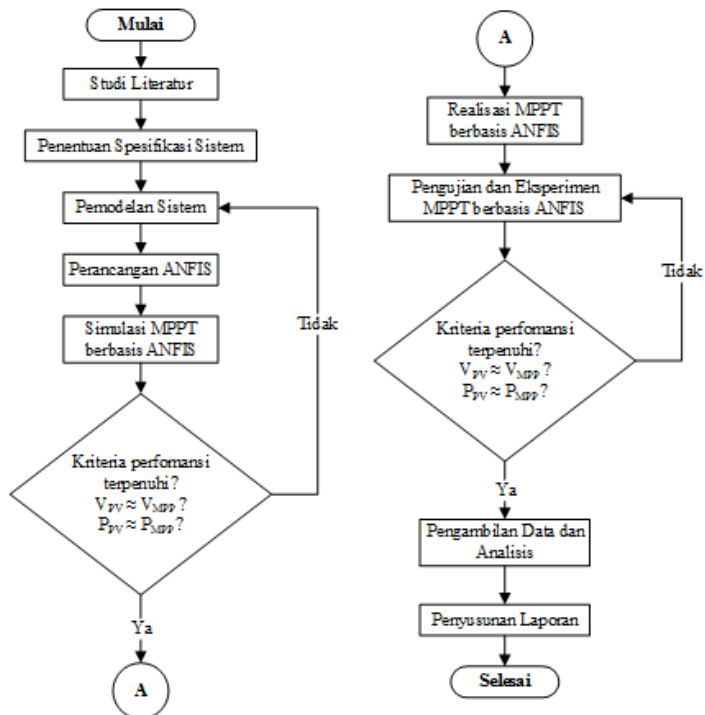
Komponen penyusun sistem penjejak matahari terdiri dari sensor, kontroler, dan aktuator berupa motor servo. Sensor digunakan untuk memberikan informasi pada kontroler untuk memberikan aksi kontrol. Sensor dapat berupa sensor cahaya ataupun sensor kompas. Motor servo sebagai aktuator akan mengubah orientasi penjejak matahari agar selalu menjejak gerak matahari sesuai sinyal kontrol. Salah satu kekurangan dari sistem penjejak matahari adalah memerlukan catu daya yang cukup besar untuk dapat beroperasi[12]. Hal ini menyebabkan sistem penjejak matahari tidak cocok digunakan untuk PLTS skala kecil.



## BAB III METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1 Diagram Alir

Penelitian Tugas Akhir yang dilakukan terdiri dari beberapa tahapan. Tahapan penelitian tersebut digambarkan dalam bentuk diagram alir sebagai berikut:



**Gambar 3.1** Diagram alir penelitian.

Tahapan-tahapan penelitian berdasarkan diagram alir pada Gambar 3.1 dijelaskan sebagai berikut:

#### A. Studi literatur

Penelitian ini dimulai dengan melakukan studi literatur. Literatur yang digunakan berupa buku teks, *paper*, prosiding, dan laman internet dengan topik seputar fotovoltaik, kecerdasan buatan

berbasis ANFIS, metode *Maximum Power Point Tracking* (MPPT), perancangan konverter DC-DC dan mikrokontroler.

B. Penentuan spesifikasi sistem

Tahap penelitian dilanjutkan dengan menentukan spesifikasi sistem berupa spesifikasi modul fotovoltaik (daya maksimum  $P_{MPP}$ , arus maksimum  $I_{MPP}$ , tegangan maksimum  $V_{MPP}$ , arus hubung singkat  $I_{SC}$ , dan tegangan rangkaian terbuka  $V_{OC}$ ) dan spesifikasi konverter DC-DC berdasarkan karakteristik modul fotovoltaik yang digunakan.

C. Pemodelan sistem

Penelitian dilanjutkan dengan memodelkan sistem berupa pemodelan modul fotovoltaik dan konverter DC-DC. Dengan melakukan pemodelan dapat diketahui karakteristik modul fotovoltaik dan konverter DC-DC sebagai dasar untuk merancang sistem MPPT berbasis ANFIS.

D. Perancangan ANFIS

Tahap selanjutnya merupakan perancangan ANFIS berdasarkan karakteristik yang diperoleh dari tahap sebelumnya. Perancangan ANFIS meliputi penentuan variabel input dan output; perolehan dan pemilahan pasangan data input-output sebagai data pelatihan; penentuan jumlah & jenis fungsi keanggotaan (*membership function*); dan pelatihan ANFIS.

E. Simulasi MPPT berbasis ANFIS

Tahap simulasi perlu dilakukan untuk mengetahui performansi ANFIS yang telah dirancang dilakukan pada sistem MPPT. Performansi MPPT ANFIS dalam melakukan penjajakan MPP akan dievaluasi. Simulasi dilakukan menggunakan bantuan perangkat PSIM dan MATLAB Simulink.

F. Realisasi MPPT berbasis ANFIS

Berikutnya penelitian dilanjutkan menuju tahap realisasi. Realisasi sistem MPPT ANFIS berupa perancangan dan pengujian sub-sistem berupa perangkat pengukuran tegangan dan arus, perancangan konverter DC-DC, dan implementasi ANFIS pada mikrokontroler. Proses akhir dari tahap ini adalah integrasi sub-

sistem menjadi suatu perangkat purwarupa MPPT ANFIS.

#### G. Pengujian dan eksperimen MPPT berbasis ANFIS

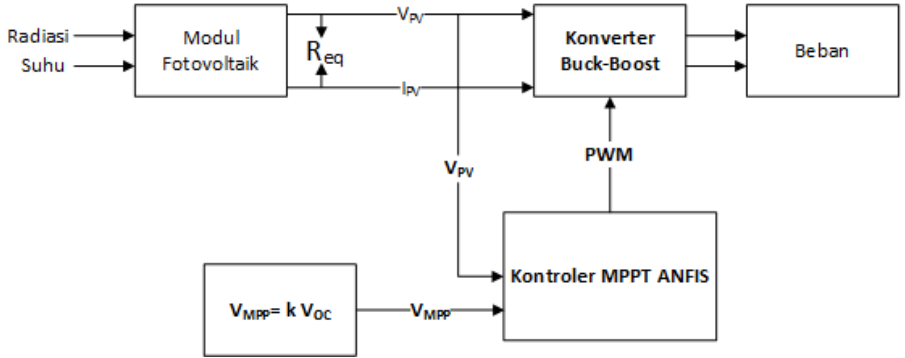
Setelah realisasi dan implementasi sistem secara keseluruhan telah selesai dilaksanakan, tahapan penelitian beranjak menuju pengujian sistem secara keseluruhan. Apabila unjuk kerja sistem sudah sesuai dengan kriteria yang diharapkan maka proses akuisisi data mulai dilakukan.

#### H. Pengambilan data dan analisis

Data yang telah diperoleh dari proses sebelumnya kemudian diolah dan dianalisis untuk mengetahui kinerja MPPT ANFIS dalam melakukan penjejakan MPP serta peningkatan efisiensi konversi yang diperoleh. Selanjutnya hasil penelitian disusun dan dilaporkan dalam bentuk buku laporan Tugas Akhir .

### 3.2 Diagram blok MPPT ANFIS

MPPT ANFIS yang dirancang pada penelitian ini terdiri dari konverter DC-DC *buck-boost*, kontroler MPPT ANFIS, dan sensor tegangan-arus. Seperti telah dijelaskan pada Subbab 2.2 bahwa konverter *buck-boost* mempunyai peran untuk mengubah-ubah nilai  $R_{eq}$  berdasarkan nilai *duty cycle* yang diterima. Kontroler MPPT ANFIS dalam hal ini akan melakukan penjejakan dengan memberikan output *duty cycle* tertentu sedemikian sehingga  $R_{eq}=R_{opt}$  dan kondisi MPP tercapai. Input untuk kontroler MPPT ANFIS berupa tegangan panel fotovoltaik  $V_{pv}$  dan tegangan  $V_{MPP}$ . Input tegangan panel fotovoltaik berasal dari pembacaan sensor tegangan. Nilai tegangan  $V_{MPP}$  diperoleh menggunakan *open-voltage method* (Subbab 2.2.2). Metode ini dipilih karena memiliki efisiensi yang cukup baik, sederhana, dan murah[8] karena hanya dibutuhkan sensor tegangan untuk memperoleh informasi nilai  $V_{MPP}$ . Pada penelitian MPPT ANFIS sebelumnya diperlukan sensor suhu dan radiasi matahari yang mahal untuk memperkirakan nilai  $V_{MPP}$ [9].



**Gambar 3.2** Diagram blok MPPT ANFIS.

Blok kontroler MPPT ANFIS terdiri dari kontroler ANFIS, dan generator PWM seperti ditampilkan pada Gambar 3.3. Input kontroler ANFIS berupa nilai error  $e$  dan selisih error  $\Delta e$  yang dinyatakan dengan persamaan

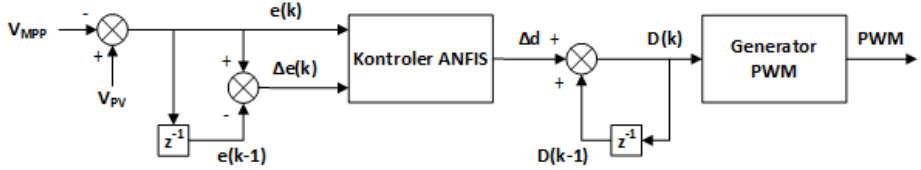
$$e(k) = V_{pv}(k) - V_{mpp}(k) \quad (3.1)$$

$$\Delta e(k) = e(k) - e(k - 1) \quad (3.2)$$

dimana  $e(k)$  adalah error saat ini dan  $e(k - 1)$  adalah error sebelumnya. Output yang dihasilkan berupa selisih *duty cycle*  $\Delta d$ . Nilai *duty cycle*  $D$  diperoleh dengan menggunakan persamaan

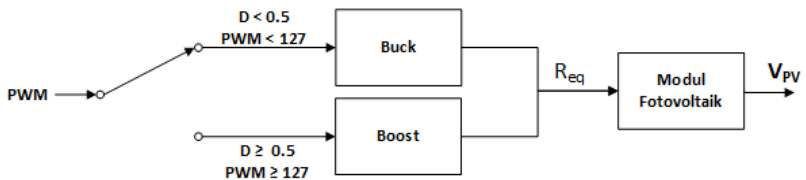
$$D(k) = D(k - 1) + \Delta d(k) \quad (3.3)$$

dimana  $D(k)$  adalah *duty cycle* saat ini,  $D(k - 1)$  adalah *duty cycle* sebelumnya, dan  $\Delta d(k)$  adalah selisih *duty cycle* saat ini. Nilai  $D$  dengan rentang nilai 0 – 1 kemudian akan diubah menjadi nilai PWM oleh blok generator PWM. Mikrokontroler Arduino Mega 2560 mampu menghasilkan nilai PWM sebesar 8 bit sehingga diperoleh rentang nilai PWM sebesar 0 – 255.



**Gambar 3.3** Diagram blok kontroler MPPT ANFIS.

Generator PWM akan menghasilkan nilai PWM dengan *duty cycle* tertentu sebagai sinyal *switching* ON-OFF pada *switch* S seperti diilustrasikan pada Gambar 2.11. Pada kenyataannya, MOSFET digunakan sebagai *switch* pada konverter DC-DC termasuk konverter *buck-boost*. PWM dengan *duty cycle* bernilai nol menyatakan MOSFET dalam keadaan *open* sedangkan *duty cycle* bernilai 1 (satu) menyatakan MOSFET dalam keadaan *short*. Dengan demikian, dapat dinyatakan bahwa MOSFET bekerja layaknya seperti resistor variabel dengan nilai resistansi dari nol (0) – tak hingga ( $\infty$ ) yang diatur berdasarkan nilai *duty cycle*. Input konverter *buck-boost* pada sistem MPPT biasanya dihubungkan dengan terminal modul fotovoltaik. Oleh karena itu, perubahan *duty cycle* pada konverter akan secara langsung mengubah  $R_{eq}$  pada terminal modul fotovoltaik. Perubahan  $R_{eq}$  ini akan mengubah titik kerja modul pada kurva I-V sehingga tegangan maupun arus modul fotovoltaik akan ikut berubah. MPPT ANFIS akan memberikan nilai *duty cycle* sedemikian rupa sehingga nilai  $R_{eq} = R_{opt}$ . Pada keadaan demikian, modul fotovoltaik akan bekerja pada kondisi MPP. Diagram blok mekanisme perubahan tegangan modul fotovoltaik akibat perubahan *duty cycle* PWM ditampilkan pada Gambar 3.4.



**Gambar 3.4** Diagram blok konverter *buck-boost*.

### 3.3 Spesifikasi Sistem

Modul fotovoltaik yang digunakan pada penelitian adalah TN-20M yang mampu menghasilkan daya sebesar 20 Watt-peak (Wp). Spesifikasi modul ditampilkan pada Tabel 3.1.

**Tabel 3.1** Spesifikasi modul fotovoltaik.

<b>Model</b>	TN-20M
<b>Maximum Power at STC (<math>P_{MPP}</math>)</b>	20 W
<b>Maximum Power Voltage at STC (<math>V_{MPP}</math>)</b>	17,2 V
<b>Maximum Power Current at STC (<math>I_{MPP}</math>)</b>	1,16 A
<b>Open Circuit Voltage at STC (<math>V_{OC}</math>)</b>	21,5 V
<b>Short Circuit Current at STC (<math>I_{SC}</math>)</b>	1,25 A
<b>Temperature Coefficient of <math>V_{OC}</math></b>	-0,36 %/°C
<b>Temperature Coefficient of <math>I_{SC}</math></b>	0,05 %/°C
<b>Series Connected Cell per Modul</b>	36

Konverter DC-DC yang digunakan adalah konverter *buck-boost* yang dapat menghasilkan tegangan output lebih besar ataupun lebih kecil dibandingkan dengan tegangan input. Konverter *buck-boost* ini akan berperan sebagai *interface* antara modul fotovoltaik dengan beban. Konverter *buck-boost* dipilih sebagai *inteface* pada sistem MPPT ANFIS karena tidak adanya batasan pada nilai resistansi beban output konverter[5] dan mampu mengemulasikan resistansi ekuivalen  $R_{eq}$  pada input konverter (terminal modul fotovoltaik) dari nilai nol ( $R_{eq} = 0 \Omega$ ) hingga tak terhingga ( $R_{eq} = \infty \Omega$ )[14]. Oleh karena itu, penggunaan konverter *buck-boost* pada sistem MPPT dapat membuat modul fotovoltaik beroperasi dari kondisi *short-circuit* ( $I_{SC}$ ) hingga *open-circuit* ( $V_{OC}$ ) dengan mengubah-ubah *duty cycle* konverter.

Penentuan spesifikasi konverter *buck-boost* dipengaruhi oleh beberapa parameter diantaranya tegangan dan arus input; tegangan dan arus output, frekuensi pensaklaran serta beban resistif nominal[15]. Spesifikasi konverter *buck-boost* yang digunakan ditampilkan pada Tabel 3.2.

**Tabel 3.2** Spesifikasi konverter *buck-boost*[15].

Parameter	Nilai
$V_{in}$	9 – 22 V
$V_{out}$ nominal	14 V
$I_{out}$	1,5 A
Frekuensi pensaklaran	25 kHz
Induktor	193 $\mu$ H
Kapasitor output	470 $\mu$ F, 50V
Beban resistif nominal	8 $\Omega$

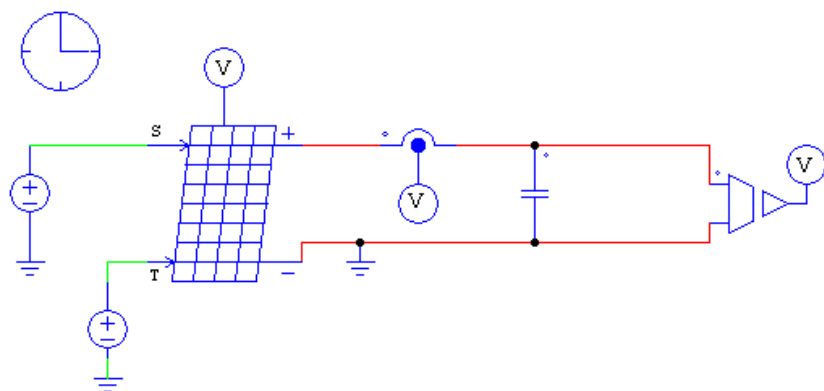
### 3.4 Pemodelan dan Simulasi Subsistem

Pemodelan dan simulasi dilakukan untuk mengetahui karakteristik masing-masing subsistem. Perangkat lunak yang digunakan untuk melakukan pemodelan dan simulasi adalah PSIM 9.0 dan MATLAB Simulink R2009a.

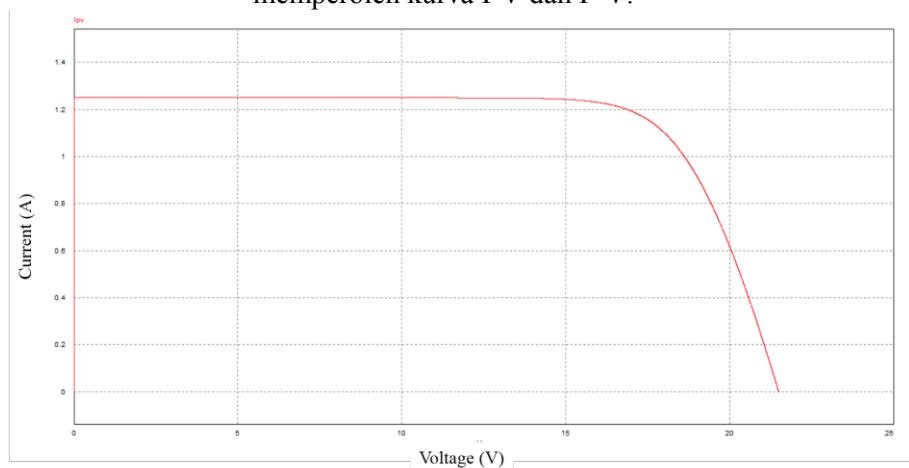
#### 3.4.1 Pemodelan dan Simulasi Modul Fotovoltaik

Pemodelan dan simulasi dilakukan menggunakan model fotovoltaik *PV Array* yang telah tersedia pada perangkat lunak PSIM 9.0. Panel fotovoltaik yang digunakan pada pemodelan dan simulasi adalah TN-20M. Parameter-parameter yang diperlukan untuk memodelkan panel sesuai dengan yang tercantum pada Tabel 3.1.

Untuk mengetahui tingkat keakuratan hasil pemodelan modul fotovoltaik dilakukan perbandingan antara parameter hasil pemodelan dengan parameter pada *datasheet*. Parameter yang tertera pada *datasheet* panel merupakan kondisi panel yang diukur pada *Standard Test Condition* (STC) yaitu pada keadaan radiasi matahari bernilai 1000 W/m<sup>2</sup> dan suhu bernilai 25°C. Bentuk kurva I-V dan P-V modul fotovoltaik TN-20M hasil pemodelan pada kondisi STC ditampilkan pada Gambar 3.5 dan Gambar 3.6.

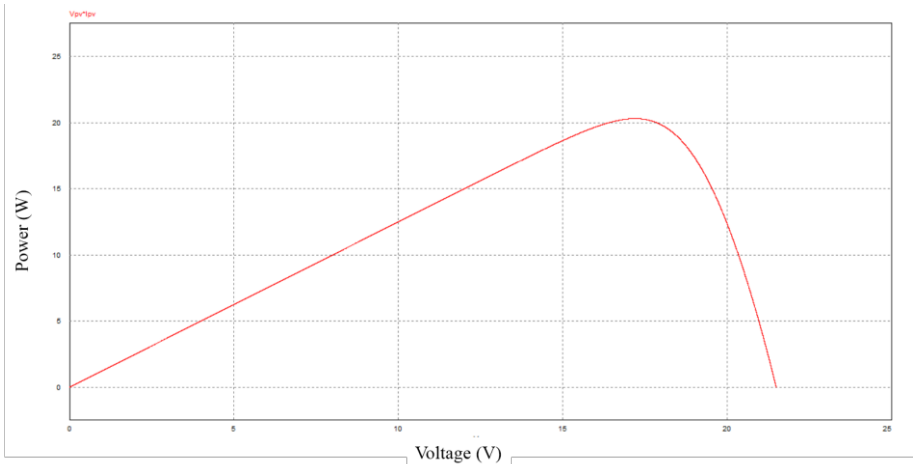


**Gambar 3.5** Pemodelan rangkaian modul fotovoltaik untuk memperoleh kurva I-V dan P-V.



**Gambar 3.6** Kurva I-V modul TN-20M hasil pemodelan pada STC.





**Gambar 3.7** Kurva P-V modul TN-20M hasil pemodelan pada STC.

Untuk mengetahui tingkat keakuratan hasil pemodelan modul fotovoltaik dilakukan perbandingan antara parameter hasil pemodelan dengan parameter pada *datasheet*.

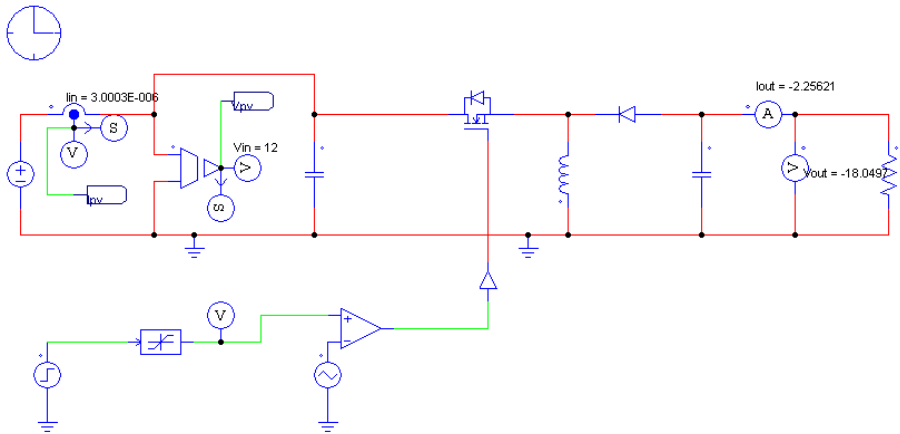
**Tabel 3.3** Perbandingan parameter modul fotovoltaik pada kondisi STC.

Parameter	<i>Datasheet</i>	Model
Maximum Power ( $P_{MPP}$ )	20 W	20.30 W
Maximum Power Voltage ( $V_{MPP}$ )	17,20 V	17,20 A
Maximum Power Current ( $I_{MPP}$ )	1,16 A	1.18 A
Open Circuit Voltage ( $V_{OC}$ )	21,50 V	21.50 V
Short Circuit Current ( $I_{SC}$ )	1,25 A	1.25 A

Berdasarkan Tabel 3.3 terlihat bahwa pada setiap parameter hasil pemodelan menunjukkan hasil yang mendekati dengan nilai *datasheet*. Oleh karena itu, model modul fotovoltaik yang digunakan dianggap sudah baik.

### 3.4.2 Pemodelan dan Simulasi Konverter DC-DC

Pemodelan dan simulasi konverter DC-DC dilakukan untuk mengetahui karakteristik konverter terhadap perubahan *duty cycle*.



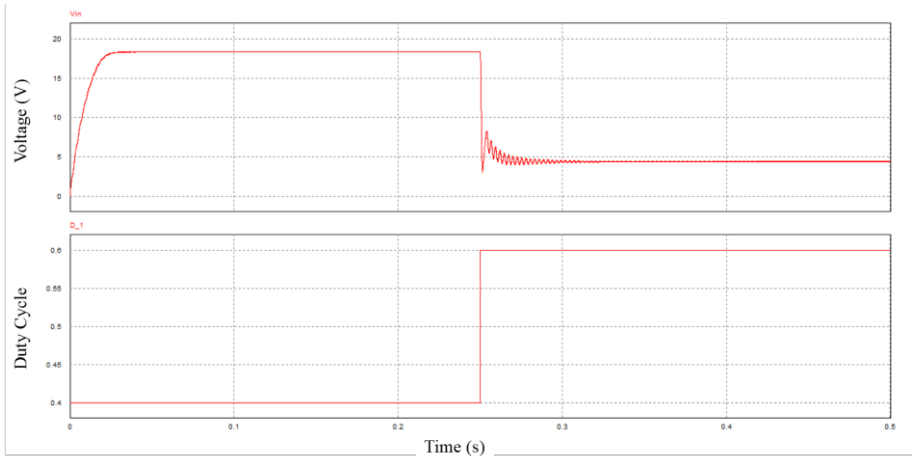
**Gambar 3.8** Pemodelan rangkaian konverter *buck-boost*.

Komponen yang digunakan pada pemodelan konverter *buck-boost* sesuai dengan nilai yang tertera pada Tabel 3.2. Saat simulasi digunakan tegangan input  $V_{in} = 12$  volt dan variasi *duty cycle*  $D$  dengan perubahan *step* dari 0.4 menuju 0.6. Hasil simulasi yang ditampilkan pada Tabel 3.4 menunjukkan bahwa konverter *buck-boost* yang dimodelkan telah sesuai dengan karakteristik yang telah dijelaskan pada Subbab 2.3.1 poin C.

**Tabel 3.4** Hasil simulasi konverter *buck-boost*.

<i>Duty cycle</i>	$V_{in}$ (Volt)	$V_{out}$ (Volt)
0,4	12	-8 V
0,6	12	-18 V

Variabel yang dikontrol oleh MPPT adalah tegangan input konverter *buck-boost* atau tegangan output panel fotovoltaik. Untuk itu perlu diketahui perubahan *duty cycle* terhadap perubahan tegangan input konverter dengan cara memberikan variasi nilai input *duty cycle* secara *step* pada konverter *buck-boost*.



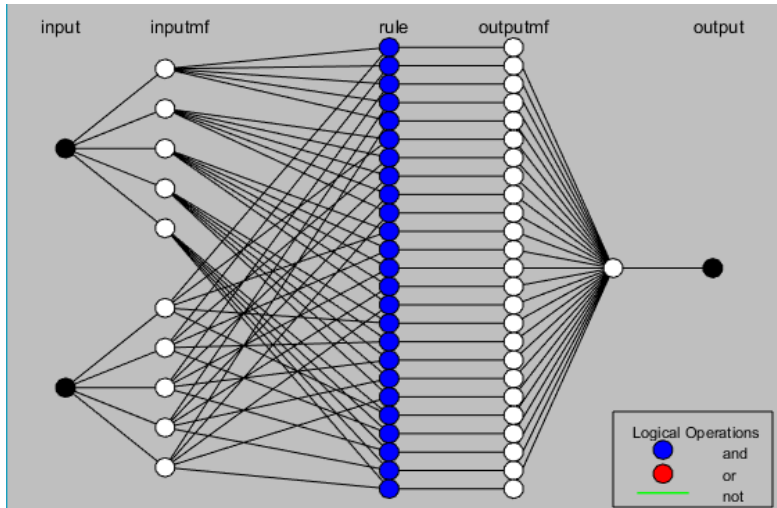
**Gambar 3.9** Respon  $V_{pv}$  terhadap perubahan step positif *duty cycle*.

Diketahui bahwa respon tegangan input konverter terbalik dengan perubahan *duty cycle* seperti pada Gambar 3.8. Saat diberikan *duty cycle* step positif, tegangan input konverter DC-DC menghasilkan step negatif. Oleh karena itu, nilai *setpoint* berupa  $V_{MPP}$  harus diberikan gain negatif dan tegangan modul fotovoltaik  $V_{pv}$  harus diberikan *gain* positif seperti ditampilkan pada Persamaan 3.1.

### 3.5 Perancangan ANFIS.

ANFIS pada penelitian ini digunakan sebagai kontroler pada MPPT. Input yang digunakan pada ANFIS terdiri 2 buah yaitu error  $e$  dan selisih error  $\Delta e$ . Output yang dihasilkan adalah nilai selisih *duty cycle*  $\Delta d$ . Seperti halnya Jaringan Syarat Tiruan, ANFIS perlu diberikan pelatihan terlebih dahulu menggunakan pasangan data input-output. Pelatihan perlu dilakukan agar ANFIS mampu mempelajari informasi mengenai sekumpulan data tersebut. Saat proses pelatihan, dilakukan penyesuaian parameter-parameter premis dan konsekuen sehingga ANFIS mampu membentuk model yang sesuai dengan sekumpulan data pelatihan yang diberikan. Pada penelitian ini perancangan ANFIS dilakukan

dengan bantuan ANFIS Editor GUI pada perangkat lunak MATLAB.



**Gambar 3.10** Struktur ANFIS.

Struktur ANFIS terdiri dari lima buah lapisan yang memiliki fungsi berbeda-beda. Struktur ANFIS yang ditampilkan pada Gambar 3.9. Pada lapisan kedua terdapat sekumpulan fungsi keanggotaan input untuk menentukan derajat keanggotaan nilai input yang diberikan. Selain itu pada lapisan keempat terdapat sekumpulan fungsi keanggotaan output untuk menentukan derajat pengaktifan (*firing strength*) dari setiap aturan-aturan (*rules*) pada lapisan kedua.

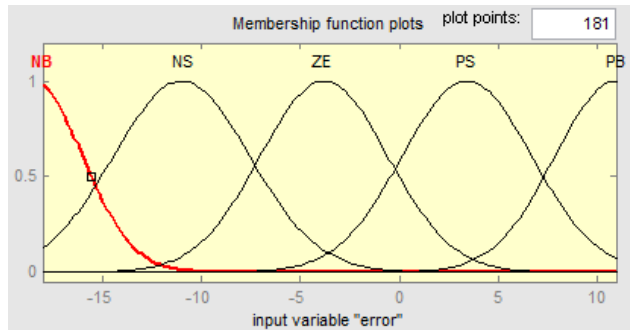
Pada penelitian ini, fungsi keanggotaan dipilih sedemikian rupa sehingga hasil pelatihan memiliki error terkecil. Jenis fungsi keanggotaan input yang digunakan adalah tipe Gaussian (*gaussmf*) sebanyak 5 buah untuk masing-masing input. Persamaan fungsi keanggotaan Gaussian adalah

$$\mu(x) = e^{-\frac{(x-c)^2}{2\sigma^2}} \quad (3.4)$$

dimana  $x$  adalah input,  $c$  adalah titik tengah fungsi Gauss dan  $\sigma$  adalah standar deviasi. Ketiga parameter ini dinamakan parameter

premis adaptif. Parameter premis adaptif akan diubah-ubah selama proses pelatihan.

Setelah dilakukan pelatihan, diperoleh bentuk fungsi keanggotaan input dengan parameter-parameter yang sudah dioptimalkan seperti ditampilkan pada Gambar 3.10 untuk input error dan Gambar 3.11 untuk input selisih (delta) error.



**Gambar 3.11** Fungsi keanggotaan untuk input error.

Input error hasil pelatihan terdiri dari 5 buah fungsi keanggotaan dengan parameter sebagai berikut:

NB [ $\sigma=2,521$ ;  $c=-18,49$ ]

NS [ $\sigma=3,443$ ;  $c=-10,99$ ]

ZE [ $\sigma=3,217$ ;  $c=-3,806$ ]

PS [ $\sigma=3,271$ ;  $c=3,404$ ]

PB [ $\sigma=3,059$ ;  $c=10,9$ ]

Apabila diterapkan pada mikrokontroler maka kode program akan menjadi sebagai berikut:

```
//fuzzy set error
```

```
float nume1 = pow(e-ce1,2); float dene1 = pow(sige1,2);
```

```
float nume2 = pow(e-ce2,2); float dene2 = pow(sige2,2);
```

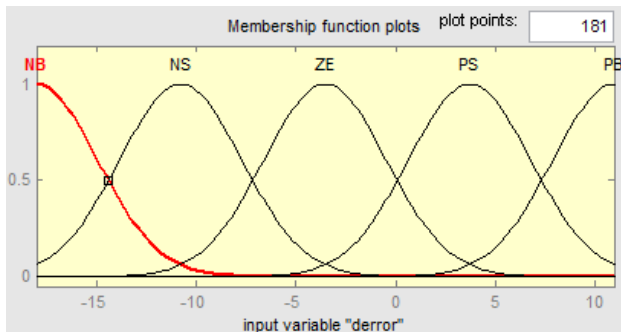
```
float nume3 = pow(e-ce3,2); float dene3 = pow(sige3,2);
```

```
float nume4 = pow(e-ce4,2); float dene4 = pow(sige4,2);
```

```
float nume5 = pow(e-ce5,2); float dene5 = pow(sige5,2);
```

```
float Ue1 = exp(-(nume1)/(2*dene1));
float Ue2 = exp(-(nume2)/(2*dene2));
float Ue3 = exp(-(nume3)/(2*dene3));
float Ue4 = exp(-(nume4)/(2*dene4));
float Ue5 = exp(-(nume5)/(2*dene5));
```

dimana variabel  $e$ ,  $ce$ , dan  $sige$  dalam kode secara berurutan merupakan error tegangan, titik tengah fungsi Gaussian ( $c$ ), dan standar deviasi ( $\sigma$ ).



**Gambar 3.12** Fungsi keanggotaan untuk input selisih error.

Input selisih (delta) error hasil pelatihan terdiri dari 5 buah fungsi keanggotaan dengan parameter sebagai berikut:

NB [ $\sigma=3,07$ ;  $c=-17,99$ ]

NS [ $\sigma=3,07$ ;  $c=-10,76$ ]

ZE [ $\sigma=3,069$ ;  $c=-3,536$ ]

PS [ $\sigma=3,07$ ;  $c=3,693$ ]

PB [ $\sigma=3,07$ ;  $c=10,92$ ]

Apabila diterapkan pada mikrokontroler maka kode program akan menjadi sebagai berikut:

```
// fuzzy set derror
float numde1 = pow(de-cde1,2); float dende1 = pow(sigde1,2);
float numde2 = pow(de-cde2,2); float dende2 = pow(sigde2,2);
float numde3 = pow(de-cde3,2); float dende3 = pow(sigde3,2);
float numde4 = pow(de-cde4,2); float dende4 = pow(sigde4,2);
float numde5 = pow(de-cde5,2); float dende5 = pow(sigde5,2);
```

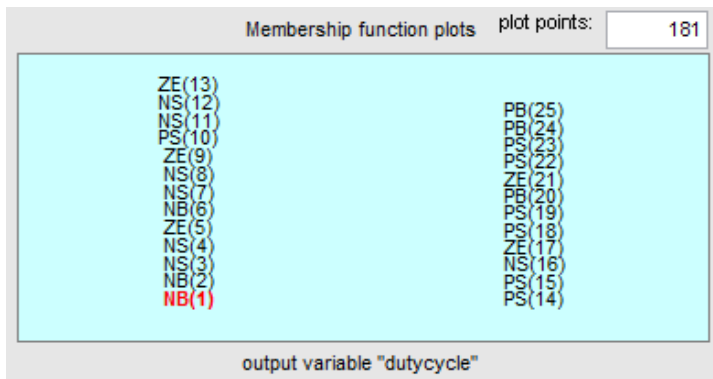
```
float Ude1 = exp(-(numde1)/(2*dende1));
float Ude2 = exp(-(numde2)/(2*dende2));
float Ude3 = exp(-(numde3)/(2*dende3));
float Ude4 = exp(-(numde4)/(2*dende4));
float Ude5 = exp(-(numde5)/(2*dende5));
```

dimana variabel *de*, *ce*, dan *sige* dalam kode secara berurutan merupakan selisih (delta) error tegangan, titik tengah fungsi Gaussian (*c*), dan standar deviasi ( $\sigma$ ).

Fungsi keanggotaan output yang digunakan pada ANFIS yang dirancang adalah fungsi orde nol yaitu

$$f = c \quad (3.5)$$

dimana *c* adalah parameter konsekuen adaptif berbentuk konstanta. Seperti halnya parameter premis, parameter konsekuen pada fungsi keanggotaan output juga akan diubah-ubah selama proses pelatihan.



**Gambar 3.13** Fungsi keanggotaan output.

Setelah dilakukan pelatihan, diperoleh 25 buah fungsi keanggotaan output dengan parameter konsekuen sebagai berikut:

NB(1)	[2.798e-005]	PS(14)	[0.02669]
NB(2)	[-0.0006443]	PS(15)	[-0.05613]
NS(3)	[-0.05019]	NS(16)	[-9.6e-007]
NS(4)	[0.05311]	ZE(17)	[-0.02135]

ZE(5)	[0.0005697]	PS(18)	[-0.01883]
NB(6)	[3.629e-006]	PS(19)	[0.02271]
NS(7)	[0.001558]	PB(20)	[-0.02461]
NS(8)	[0.1764]	ZE(21)	[4.282e-006]
ZE(9)	[-0.192]	PS(22)	[0.0842]
PS(10)	[-0.002624]	PS(23)	[0.01417]
NS(11)	[-3.575e-006]	PB(24)	[-0.01028]
NS(12)	[-0.07225]	PB(25)	[0.002296]
ZE(13)	[-0.02732]		

Aturan-aturan (*rules*) yang terbentuk setelah pelatihan berjumlah sebanyak 25 buah seperti yang disajikan pada Tabel 3.5.

**Tabel 3.5** Basis aturan-aturan (*rules*).

		e				
		NB	NS	ZE	PS	PB
$\Delta e$	NB	NB(1)	NB(6)	NS(11)	NS(16)	ZE(21)
	NS	NB(2)	NS(7)	NS(12)	ZE(17)	PS(22)
	ZE	NS(3)	NS(8)	ZE(13)	PS(18)	PS(23)
	PS	NS(4)	ZE(9)	PS(14)	PS(19)	PB(24)
	PB	ZE(5)	PS(10)	PS(15)	PB(20)	PB(25)

Keterangan :

e : error tegangan

$\Delta e$  : selisih error tegangan saat ini dan sebelumnya

NB : *Negative Big*

NS : *Negative Small*

ZE : *Zero*

PS : *Positive Small*

PB : *Positive Big*

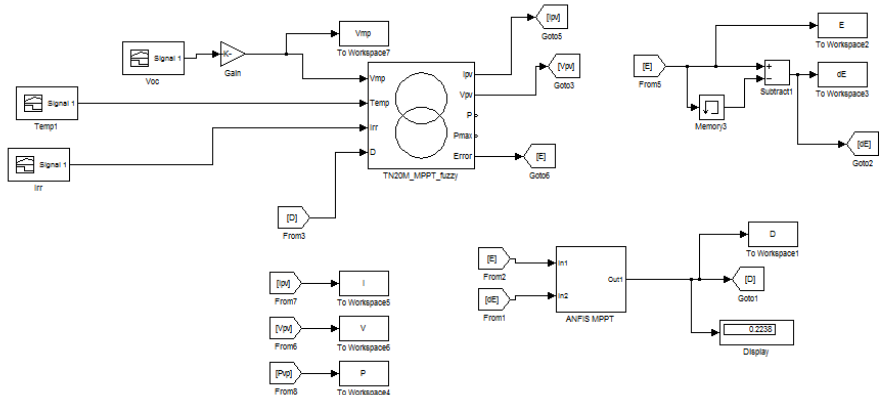
Setelah pelatihan selesai dilaksanakan maka ANFIS siap digunakan untuk proses inferensi. Pada lapisan kedua, derajat keanggotaan setiap fungsi keanggotaan akan diperoleh sesuai dengan input error dan selisih error yang diberikan. Selanjutnya derajat pengaktifan untuk setiap *fuzzy rule* akan diberikan dengan mengalikan setiap derajat keanggotaan sesuai dengan Persamaan 2.15. Pada lapisan ketiga derajat pengaktifan yang telah diperoleh



akan dinormalisasikan menggunakan formulasi seperti pada Persamaan 2.16. Pada lapisan keempat derajat pengaktifan ternormalisasi pada setiap simpul akan dikalikan dengan parameter konsekuensi menggunakan Persamaan 2.17. Akhirnya pada lapisan kelima seluruh keluaran dari simpul-simpul sebelumnya akan dijumlahkan dan diperoleh hasil inferensi berupa selisih *duty cycle*.

### 3.6 Rancangan simulasi MPPT berbasis ANFIS

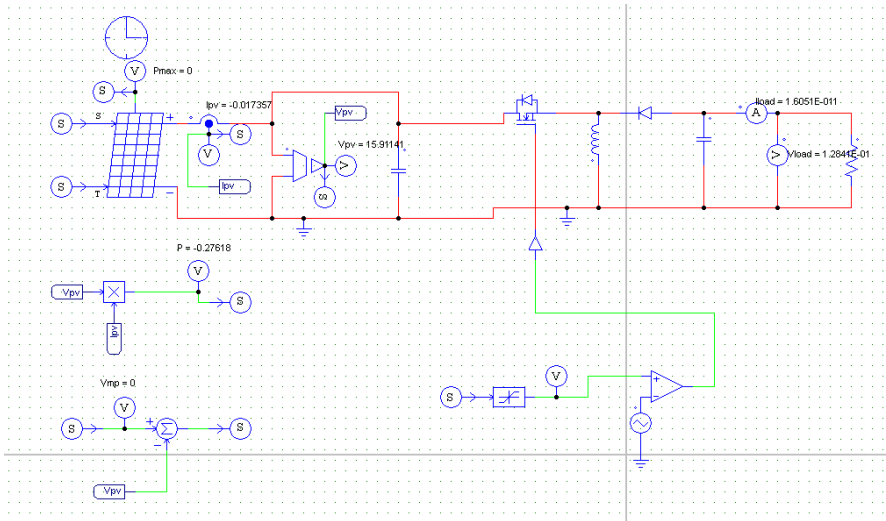
Simulasi MPPT ANFIS secara keseluruhan dilakukan dengan menggabungkan model modul fotovoltaik dengan model konverter *buck-boost*. Blok kontroler MPPT ANFIS kemudian ditambahkan untuk mengatur *duty cycle* konverter *buck-boost* sesuai dengan kondisi iklim yang bervariasi sehingga modul fotovoltaik dapat menghasilkan daya maksimum. Untuk mengetahui unjuk kerja kontroler ANFIS dalam menjalankan aksi MPPT, diberikan variasi input step nilai radiasi matahari dan suhu modul fotovoltaik.



**Gambar 3.14** Simulasi MPPT ANFIS pada Simulink.

Simulasi dilakukan menggunakan bantuan perangkat lunak PSIM 9.0 dan MATLAB Simulink. Kedua perangkat lunak dapat digunakan secara *co-simulation* dengan menggunakan modul SimCoupler. Pemodelan subsistem konverter *buck-boost* terhubung dengan panel fotovoltaik dilakukan pada PSIM dan

subsistem MPPT ANFIS dilakukan menggunakan MATLAB Simulink.



**Gambar 3.15** Simulasi MPPT ANFIS pada PSIM.

### 3.7 Realisasi MPPT ANFIS

Realisasi MPPT ANFIS dibedakan menjadi beberapa subsistem yaitu sensor, konverter DC-DC, dan kontroler. Sensor yang digunakan adalah sensor arus dan tegangan INA219. Pengukuran tegangan dilakukan untuk mendapatkan nilai error dan selisih error tegangan panel fotovoltaik serta pengukuran arus dilakukan untuk mengetahui daya listrik yang dihasilkan. Konverter DC-DC yang digunakan adalah konverter *buck-boost* yang telah dikembangkan pada penelitian lain sesuai dengan spesifikasi pada Tabel 3.7[15]. Arduino MEGA 2560 digunakan sebagai kontroler sekaligus sebagai perangkat akuisisi data. Berikut merupakan komponen-komponen yang digunakan pada MPPT ANFIS.


### A. Sensor INA219

**Tabel 3.6** Spesifikasi sensor INA219.

No.	Keterangan	Spesifikasi	Ilustrasi
1.	<i>Range</i> pengukuran arus	$\pm 3,2 \text{ A}$	 sumber: adafruit.com
2.	Resolusi pengukuran tegangan	0,8 mV	
3.	<i>Range</i> pengukuran tegangan	0 – 26 V	
4.	Tegangan suplay	3.3 – 5 V	
5.	Suhu operasi	-40 to 125°C	
6.	Fitur khusus	Bi-directional I2C Programmable Gain	

### B. Konverter *Buck-boost*

**Tabel 3.7** Spesifikasi konverter *buck-boost*.

No.	Keterangan	Spesifikasi	Ilustrasi
1	$V_{in}$	9 – 22 V	
2	$V_{out}$ nominal	14 V	
3	$I_{out}$	1,5 A	
4	Frekuensi pensaklaran	25 kHz	
5	Induktor	193 $\mu\text{H}$	
6	Kapasitor output	470 $\mu\text{F}$ , 50V	
7	Beban resistif nominal	8 $\Omega$	

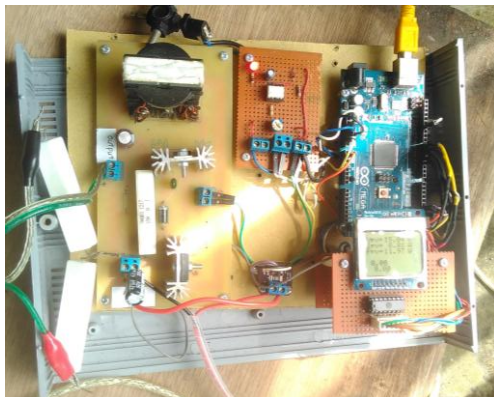
## C. Arduino MEGA 2560

**Tabel 3.8** Spesifikasi Arduino MEGA 2560.

No.	Mikrokontroler	ATmega2560
1.	Tegangan Operasi	5 V
2.	Tegangan Input (rekomendasi)	7-12 V
4.	Jumlah Pin Digital I/O	54 (15 sebagai PWM)
5.	Jumlah Pin Analog	16
6.	Arus DC setiap pin I/O	20 mA
7.	Arus DC untuk pin 3.3V	50 mA
8.	Flash Memory	256 KB (8KB bootloader)
9.	SRAM	8 KB
10.	EEPROM	4 KB
11.	Kecepatan Clock	16 MHz
12.	LED BUILTIN	13



sumber :  
pololu.com

**Gambar 3.16** Realisasi perangkat keras MPPT ANFIS.

### 3.8 Pengambilan Data

Pengambilan data MPPT ANFIS dilaksanakan dengan cara melakukan perbandingan keluaran daya panel fotovoltaik yang dilengkapi MPPT ANFIS dan panel fotovoltaik yang dihubungkan langsung dengan beban (non-MPPT). Selama pengujian kedua sistem diberikan beban yang sama. Pengukuran daya pada panel fotovoltaik dengan MPPT ANFIS terdiri dari pengukuran daya input ( $P_{in}$  MPPT) dan output konverter *buck-boost* ( $P_{out}$  MPPT). Sedangkan untuk pengukuran daya pada sistem non-MPPT hanya terdiri dari pengukuran daya output ( $P_{out}$  non-MPPT). Perekaman data dilakukan dengan bantuan perangkat lunak PLX-DAQ yang akan langsung merekam data pada Microsoft Office Excel.

***“Halaman ini memang dikosongkan”***

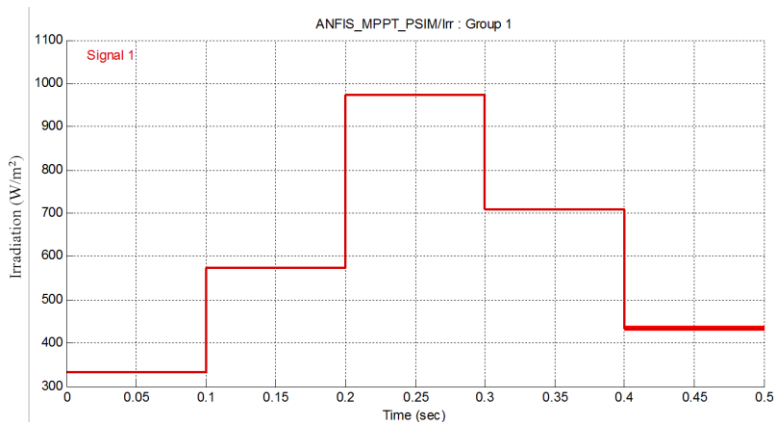
## BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Simulasi MPPT berbasis ANFIS

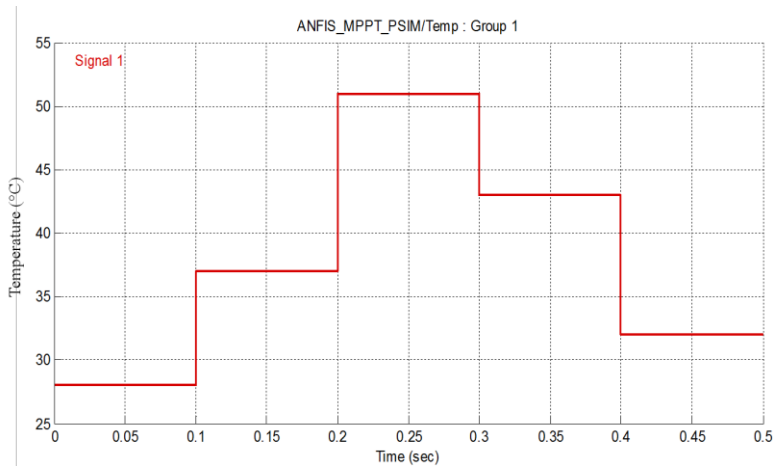
Simulasi MPPT ANFIS dilakukan untuk mengetahui unjuk kerja kontroler ANFIS yang telah dirancang dalam melakukan penjejakan MPP pada berbagai kondisi iklim. Kondisi iklim yang divariasikan pada simulasi yaitu suhu panel dan radiasi matahari. Tabel 4.1 menunjukkan variasi suhu panel dan radiasi yang dilakukan saat simulasi. Variasi suhu dilakukan dengan transisi *step*.

**Tabel 4.1** Variasi kondisi iklim saat simulasi.

Kondisi	Suhu panel ( $^{\circ}\text{C}$ )	Radiasi matahari ( $\text{W/m}^2$ )
1	28	333
2	37	574
3	51	972
4	43	710
5	32	432



**Gambar 4.1** Variasi radiasi matahari.



**Gambar 4.2** Variasi suhu panel.

Kontroler MPPT ANFIS dalam melakukan penjejakan kondisi MPP perlu mendapatkan informasi nilai tegangan  $V_{MPP}$ . Nilai tegangan  $V_{MPP}$  diperoleh menggunakan metode *Open-voltage method* seperti dijelaskan pada Subbab 2.2.2. Nilai  $V_{OC}$  dan  $V_{MPP}$  untuk berbagai variasi kondisi klimatik ditampilkan pada Tabel 4.2.

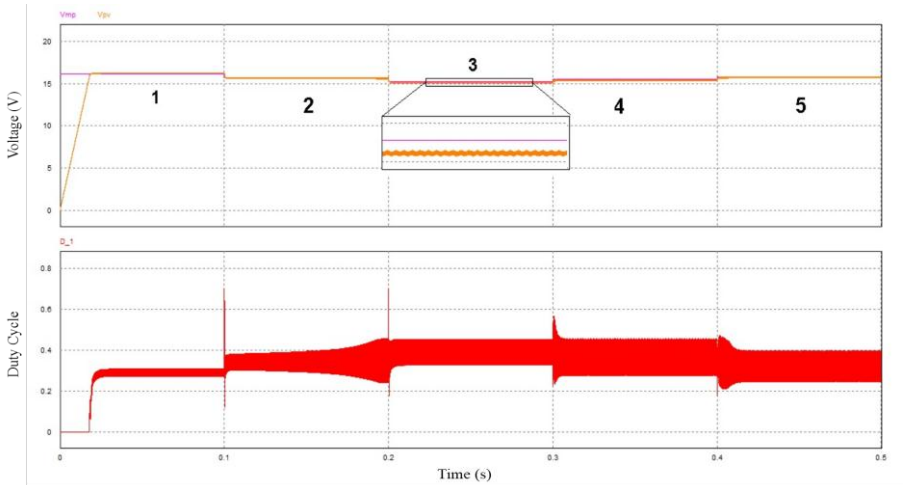
**Tabel 4.2** Nilai  $V_{OC}$  dan  $V_{MPP}$ .

Kondisi	$V_{OC}$ (V)	k	$V_{MPP}$ (V)
1	20,28	0,78	15,82
2	20,12		15,69
3	19,59		15,28
4	19,88		15,51
5	20,22		15,77

#### 4.1.1 Simulasi penjejakan $V_{MPP}$

Pada simulasi ini akan diketahui unjuk kerja MPPT ANFIS dalam melakukan penjejakan tegangan  $V_{MPP}$  pada berbagai variasi kondisi klimatik. Respon sistem terhadap perubahan perubahan kondisi klimatik secara keseluruhan dapat dilihat pada Gambar 4.3.





**Gambar 4.3** Hasil penjejakan  $V_{MPP}$  MPPT ANFIS (atas: tegangan; bawah: *duty cycle*)

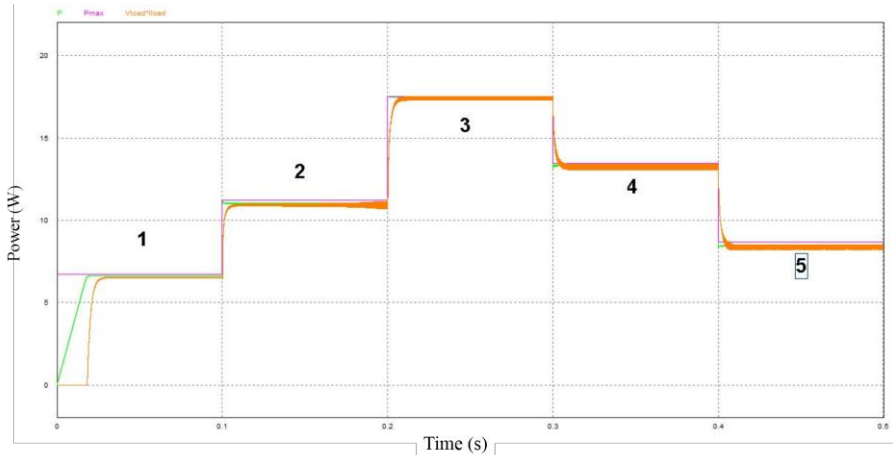
Berdasarkan respon yang dihasilkan, dapat diketahui bahwa MPPT ANFIS menunjukkan unjuk kerja yang baik dalam melakukan penjejakan tegangan  $V_{MPP}$ . Apabila ditelaah lebih lanjut, pada kondisi 2 akhir, 3 dan 4 MPPT ANFIS terlihat tidak dengan tepat menjejak tegangan  $V_{MPP}$  dan menghasilkan respon yang relatif berfluktuasi.

Dengan meninjau sinyal kontrol berupa nilai *duty cycle* dapat diketahui bahwa fluktuasi tegangan terjadi akibat simpangan *duty cycle* yang besar. Hal ini dapat dengan jelas dilihat dari respon kondisi 2. Sinyal kontrol *duty cycle* yang dihasilkan oleh kontroler MPPT ANFIS sangat fluktuatif diakibatkan kontrol ANFIS memberikan nilai perubahan *duty cycle*  $\Delta d$  yang relatif besar sebagai reaksi terhadap nilai error dan perubahan error yang relatif kecil.

#### 4.1.2 Simulasi perbandingan daya output

Panel fotovoltaik akan menghasilkan daya maksimum yang mungkin ketika berada pada kondisi MPP yaitu saat  $V_{pv}$  sama dengan  $V_{MPP}$ . Dengan menggunakan *open-voltage method* dapat diperkirakan nilai  $V_{MPP}$  berdasarkan perkalian konstanta  $k$  dengan

$V_{OC}$ . Simulasi dilakukan untuk mengetahui apakah pada nilai  $V_{MPP}$  perkiraan tersebut dapat dihasilkan daya maksimum.



**Gambar 4.4** Daya panel fotovoltaik hasil penjejukan.

Hasil penjejukan MPPT ANFIS pada berbagai kondisi klimatik menunjukan bahwa daya yang dihasilkan panel fotovoltaik ( $P_{MPPT}$ ) mendekati daya *maximum power point* ( $P_{MPP}$ ). Berdasarkan Tabel 4.3 dapat diketahui bahwa nilai  $V_{MPP}$  yang diperkirakan oleh *open-voltage method* cukup mendekati nilai  $V_{MPP}$  sebenarnya dibuktikan dengan selisih  $P_{maks}$  sebenarnya yang relatif kecil terhadap  $P_{maks}$  MPPT. Dari tabel tersebut juga diketahui bahwa daya keluaran output konverter mendekati daya masukan ( $P_{maks}$  MPPT) karena konverter *buck-boost* dimodelkan secara ideal.

**Tabel 4.3** Perbandingan  $P_{MPP}$  dan  $P_{MPPT}$ .

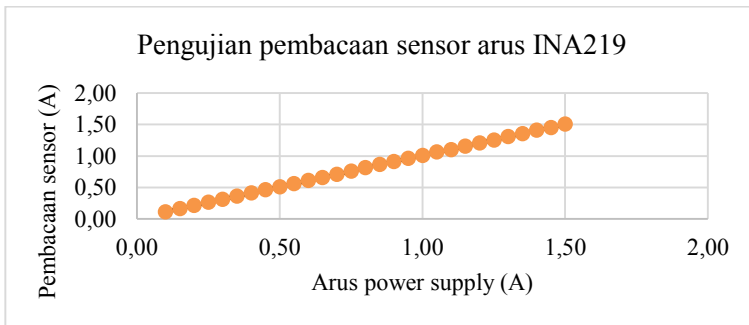
Kondisi	Keterangan	Daya (W)
1	$P_{MPP}$	6.73
	$P_{MPPT}$	6.61
	$P_{out}$ konverter	6.54
2	$P_{MPP}$	11,21
	$P_{MPPT}$	11,04
	$P_{out}$ konverter	10,90
3	$P_{MPP}$	17,51
	$P_{MPPT}$	17,50
	$P_{out}$ konverter	17,38
4	$P_{MPP}$	13,45
	$P_{MPPT}$	13,33
	$P_{out}$ konverter	13,32
5	$P_{MPP}$	8.68
	$P_{MPPT}$	8.45
	$P_{out}$ konverter	8.45

## 4.2 Pengujian perangkat keras MPPT ANFIS

### 4.2.1 Pengujian sensor

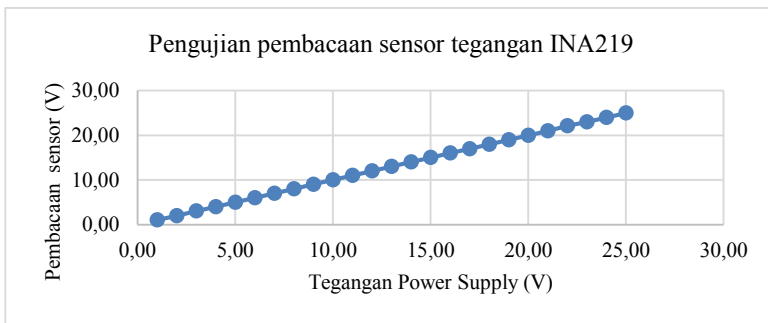
Perangkat sensor pada sistem MPPT ANFIS adalah sebagai piranti untuk mengukur besaran fisis keluaran panel fotovoltaik. Sensor yang digunakan adalah modul INA219 yang terdiri dari sensor arus dan tegangan. Pengujian sensor dilakukan untuk mengetahui performa sensor dalam melakukan pengukuran.

Sensor arus digunakan sebagai pengukur arus output yang dihasilkan panel fotovoltaik. Pengujian sensor dilakukan menggunakan DC *power supply*. Arus *power supply* divariasikan dengan kenaikan per 0.05 Ampere kemudian dicatat hasil pembacaan sensor untuk selanjutnya dibandingkan dengan arus yang tertera pada display *power supply*.



**Gambar 4.5** Hasil pengujian sensor arus INA219.

Sensor tegangan digunakan untuk mengukur tegangan output pada terminal panel fotovoltaik. Sensor tegangan pada modul INA219 memiliki jangkauan pengukuran hingga 26 volt. Pengujian dilakukan dengan menggunakan DC *power supply*. Tegangan *power supply* diubah-ubah dengan kenaikan per 1 volt kemudian hasil pembacaan sensor dicatat dan selanjutnya dibandingkan dengan tegangan *power supply*.



**Gambar 4.6** Hasil pengujian sensor tegangan INA219.

#### 4.2.2 Pengujian konverter *buck-boost*

Tujuan dari pengujian konverter *buck-boost* adalah untuk mengetahui apakah perangkat telah bekerja sesuai dengan karakteristik konverter *buck-boost* dan untuk mengetahui efisiensi konversi yang dihasilkan. Pada pengujian ini beban yang

digunakan adalah 4 buah lampu 12V 10W yang dirangkai secara seri.

**Tabel 4.4** Perbandingan tegangan keluaran konverter *buck-boost*.

<i>Duty cycle</i>	$V_{in}$ (V)	$V_{out}$		Galat (%)
		Hitung (V)	Aktual (V)	
0.10	12.00	-1.33	-1.19	10.75
0.15	12.00	-2.12	-2.24	5.78
0.20	12.00	-3.00	-3.20	6.67
0.25	12.00	-4.00	-4.17	4.25
0.30	12.00	-5.14	-5.43	5.58
0.35	12.00	-6.46	-6.91	6.94
0.40	12.00	-8.00	-8.40	5.00
0.45	12.00	-9.82	-10.4	5.93
0.50	12.00	-12.00	-12.27	2.25
0.55	12.00	-14.67	-15.02	2.41
0.60	12.00	-18.00	-18.31	1.72
0.65	12.00	-22.29	-22.40	0.51
0.70	12.00	-28.00	-28.50	1.79
<b>Rata – rata</b>				<b>4.58</b>

Untuk mengetahui karakteristik konverter *buck-boost* yang telah dibuat dilakukan pengujian dengan cara mengukur tegangan keluaran konverter terhadap variasi perubahan *duty cycle* dengan tegangan input konstan. Tegangan output aktual konverter kemudian dibandingkan dengan tegangan output perhitungan menggunakan Persamaan 2.11. Berdasarkan Tabel 4.4 diketahui bahwa tegangan output konverter mempunyai polaritas terbaik. konverter berada dalam keadaan *buck* ( $V_{in} > |V_{out}|$ ) pada nilai *duty cycle* kurang dari 0.5 dan keadaan *boost* ( $V_{in} < |V_{out}|$ ) pada nilai *duty cycle* lebih dari 0.5 dengan rata-rata galat (*error*) sebesar 4.58%. Dapat disimpulkan bahwa konverter yang dibuat telah sesuai dengan karakteristik konverter *buck-boost*.

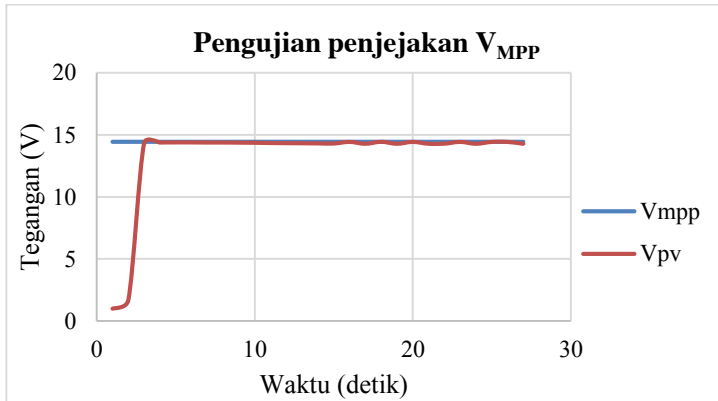
**Tabel 4.5** Efisiensi konverter *buck-boost*.

<i>Duty cycle</i>	$V_{in}$ (V)	$I_{in}$ (A)	$V_{out}$ (V)	$I_{out}$ (A)	$P_{in}$ (W)	$P_{out}$ (W)	Efisiensi (%)
0.10	12.00	0.01	1.19	0.09	0.12	0.11	89.25
0.15	12.00	0.03	2.24	0.13	0.36	0.29	80.89
0.20	12.00	0.05	3.20	0.15	0.60	0.48	80.00
0.25	12.00	0.07	4.17	0.17	0.84	0.71	84.39
0.30	12.00	0.11	5.43	0.20	1.32	1.09	82.27
0.35	12.00	0.16	6.91	0.22	1.92	1.52	79.18
0.40	12.00	0.22	8.40	0.25	2.64	2.10	79.55
0.45	12.00	0.30	10.40	0.27	3.60	2.81	78.00
0.50	12.00	0.39	12.27	0.30	4.68	3.68	78.65
0.55	12.00	0.54	15.02	0.33	6.48	4.96	76.49
0.60	12.00	0.74	18.31	0.37	8.88	6.77	76.29
0.65	12.00	1.06	22.40	0.41	12.72	9.18	72.20
0.70	12.00	1.63	28.50	0.48	19.56	13.68	69.94
<b>Rata - rata</b>							<b>79.01</b>

Efisiensi konverter *buck-boost* dapat diketahui dengan cara membandingkan daya pada sisi output dengan sisi input. Setelah dilakukan pengujian diperoleh efisiensi yang mampu dihasilkan konverter rata-rata sebesar 79.01%.

#### 4.3 Pengujian penjejakan $V_{MPP}$ MPPT ANFIS

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui unjuk kerja kontroler ANFIS yang telah dibuat pada perangkat keras MPPT dalam melakukan penjejakan  $V_{MPP}$ . Pengujian dilakukan dari kondisi *short-circuit* ( $V_{pv} = 0$ ).



**Gambar 4.7** Pengujian penjejakan  $V_{MPP}$  oleh MPPT ANFIS.

Hasil pengujian penjejakan menunjukkan bahwa MPPT ANFIS mampu mengarahkan tegangan modul fotovoltaik  $V_{pv}$  menuju tegangan  $V_{MPP}$ . Dibutuhkan waktu sekitar  $< 5$  detik untuk MPPT ANFIS menjejak tegangan  $V_{MPP}$  dari kondisi *short-circuit*. Berdasarkan hal tersebut dapat diketahui bahwa MPPT ANFIS yang dibuat telah berhasil melakukan penjejakan  $V_{MPP}$  dengan baik.

#### 4.4 Pengujian Sistem Tanpa Penjejak Matahari

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui seberapa besar peningkatan daya yang dihasilkan oleh sistem MPPT ANFIS relatif terhadap sistem non-MPPT. Sistem non-MPPT merupakan panel fotovoltaik yang langsung dihubungkan dengan beban. Pengujian dilakukan menggunakan dua buah panel fotovoltaik 20 Wp yang diletakan pada posisi sedemikian rupa sehingga selalu terpapar kondisi iklim yang sama. Beban yang digunakan adalah lampu 12V 10W. Berikut hasil pengujian yang dilakukan pada hari Minggu, 25 Desember 2016.

##### 4.4.1 Pengujian dengan beban 2 buah lampu.

Pada pengujian ini beban yang digunakan adalah 2 buah lampu yang disusun secara seri untuk masing-masing sistem. Pengujian dilakukan pukul 11.00 – 13.30 WIB.

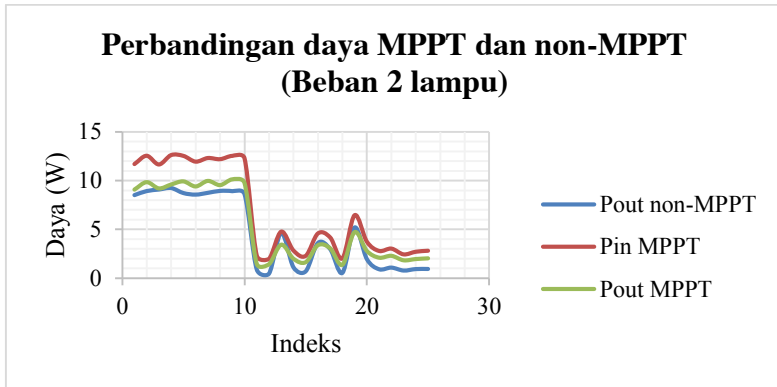
**Tabel 4.6** Perbandingan daya output beban 2 lampu.

No.	MPPT			non-MPPT		Peningkatan
	<i>Duty Cycle</i>	PWM	$P_{in}$ (W)	$P_{out}$ (W)	$P_{out}$ (W)	$P_{out}$ (%)
1.	0,54	137	11,69	9,08	8,50	6,82
2.	0,55	138	12,54	9,84	8,91	10,44
3.	0,54	137	11,65	9,20	9,07	1,43
4.	0,55	140	12,61	9,60	9,22	4,12
5.	0,55	139	12,53	9,92	8,71	13,89
6.	0,54	138	11,94	9,40	8,55	9,94
7.	0,54	138	12,31	9,97	8,73	14,20
8.	0,54	138	12,19	9,54	8,93	6,83
9.	0,55	139	12,53	10,13	8,90	13,82
10.	0,54	137	12,28	9,75	8,60	13,37
11.	0,31	79	2,32	1,46	0,88	65,91
12.	0,30	75	1,99	1,43	0,46	210,87
13.	0,42	106	4,78	3,43	4,62	-25,76
14.	0,33	83	2,84	1,99	1,11	79,28
15.	0,30	76	2,30	1,64	0,70	134,29
16.	0,40	101	4,59	3,38	3,60	-6,11
17.	0,39	98	4,18	3,06	2,97	3,03
18.	0,30	75	2,04	1,37	0,54	153,70
19.	0,44	112	6,46	4,72	5,19	-9,06
20.	0,36	90	3,75	2,79	1,95	43,08
21.	0,32	82	2,80	2,10	0,91	130,77
22.	0,34	86	3,04	2,29	1,08	112,04
23.	0,32	80	2,45	1,83	0,78	134,62
24.	0,33	83	2,72	1,96	0,93	110,75
25.	0,33	83	2,82	2,03	0,94	115,96
<b>Rata-rata peningkatan <math>P_{out}</math></b>						<b>53,93</b>

Hasil pengujian dengan beban lampu 2 lampu menunjukkan bahwa sistem MPPT ANFIS menghasilkan daya yang relatif lebih besar dibandingkan dengan sistem non-MPPT. Dari Tabel 4.6 dilihat bahwa MPPT ANFIS melakukan pengendalian *duty cycle*



untuk mencapai kondisi *maximum power point* (MPP). Akan tetapi, pada saat tertentu sistem non-MPPT menghasilkan daya lebih tinggi dibandingkan sistem MPPT ANFIS.



**Gambar 4.8** Perbandingan daya MPPT dan non-MPPT beban 2 lampu

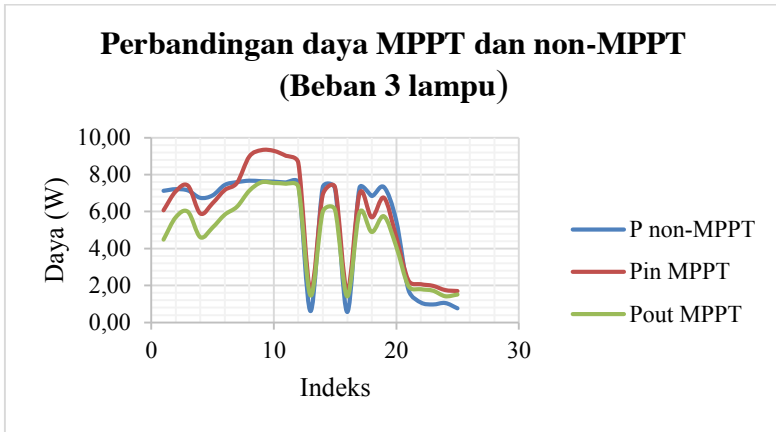
Berdasarkan Tabel 4.6 dapat dilihat bahwa daya yang masuk menuju konverter *buck-boost* MPPT ANFIS ( $P_{in}$ ) memiliki nilai relatif lebih besar dibandingkan keluaran daya sistem non-MPPT. Hal ini menunjukkan bahwa MPPT ANFIS telah mampu mengoptimalkan daya keluaran panel fotovoltaik pada kondisi iklim yang berubah-ubah. Namun pada sistem MPPT ANFIS, daya yang dapat dimanfaatkan merupakan daya keluaran konverter *buck-boost* ( $P_{out}$ ) yang memiliki efisiensi konversi sekitar 70-80% akibat rugi-rugi daya pada konverter. Berdasarkan Tabel 4.6 MPPT ANFIS mampu meningkatkan daya rata-rata sebesar 53,93 % relatif terhadap sistem non-MPPT.

#### 4.4.2 Pengujian dengan beban 3 buah lampu.

Pada pengujian ini beban yang digunakan adalah 3 buah lampu yang disusun secara seri untuk masing-masing sistem. Pengujian dilakukan pada pukul 13.30 – 16.00 WIB.

**Tabel 4.7** Perbandingan daya output beban 3 lampu.

No.	MPPT			non-MPPT		Peningkatan
	<i>Duty Cycle</i>	PWM	$P_{in}$ (W)	$P_{out}$ (W)	$P_{out}$ (W)	$P_{out}$ (%)
1.	0,47	119	6,07	4,48	7,13	-37,17
2.	0,48	123	7,10	5,69	7,22	-21,19
3.	0,49	125	7,40	5,98	7,15	-16,36
4.	0,46	117	5,90	4,61	6,75	-31,70
5.	0,47	120	6,45	5,13	6,88	-25,44
6.	0,49	123	7,17	5,83	7,45	-21,74
7.	0,49	125	7,56	6,26	7,60	-17,63
8.	0,52	132	8,98	7,12	7,68	-7,29
9.	0,53	133	9,33	7,58	7,65	-0,92
10.	0,52	133	9,29	7,54	7,63	-1,18
11.	0,52	133	9,02	7,50	7,58	-1,06
12.	0,51	130	8,65	7,34	7,57	-3,04
13.	0,25	63	1,73	1,46	0,61	139,34
14.	0,46	116	6,91	5,98	7,32	-18,31
15.	0,49	124	7,32	6,09	7,25	-16,00
16.	0,27	67	1,69	1,41	0,56	151,79
17.	0,48	121	6,97	5,93	7,29	-18,66
18.	0,44	112	5,69	4,89	6,85	-28,61
19.	0,48	122	6,75	5,74	7,33	-21,69
20.	0,42	106	4,63	4,11	5,51	-25,41
21.	0,32	80	2,27	1,97	1,76	11,93
22.	0,32	80	2,07	1,80	1,08	66,67
23.	0,31	77	1,98	1,72	0,97	77,32
24.	0,31	78	1,75	1,42	1,05	35,24
25.	0,30	76	1,70	1,51	0,76	98,68
<b>Rata-rata peningkatan <math>P_{out}</math></b>						10,70



**Gambar 4.9** Perbandingan daya MPPT dan non-MPPT beban 4 lampu.

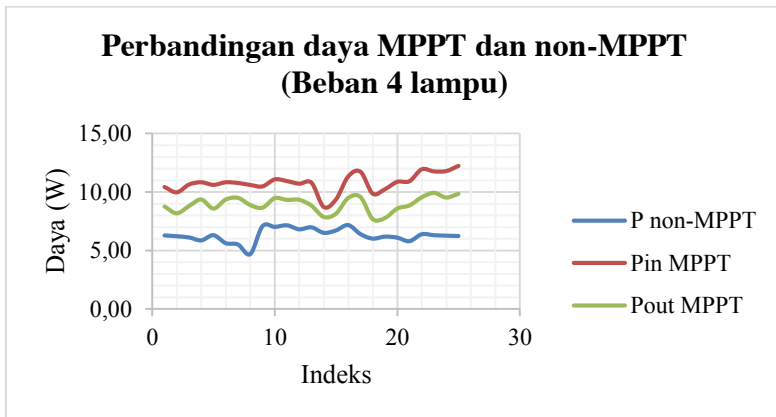
Pada pengujian kali ini daya yang dihasilkan oleh sistem non-MPPT ( $P_{\text{out non-MPPT}}$ ) hampir mendekati daya yang masuk menuju sistem non-MPPT ( $P_{\text{in MPPT}}$ ) seperti ditampilkan dalam Gambar 4.10. Konsekuensi dari hal tersebut adalah daya yang dikeluarkan oleh sistem MPPT ANFIS ( $P_{\text{out ANFIS}}$ ) menjadi lebih kecil dibandingkan dengan  $P_{\text{out non-MPPT}}$ . Oleh karena itu, pada Tabel 4.7 dapat dilihat pada saat-saat tertentu peningkatan daya bernilai negatif dengan peningkatan daya rata-rata yang diperoleh hanya 10,70%. Rendahnya peningkatan daya yang dihasilkan oleh sistem MPPT ANFIS pada pengujian ini dapat terjadi karena beban yang diberikan pada sistem non-MPPT mampu membuatnya mendekati kondisi MPP. Nilai resistansi ekuivalen  $R_{\text{eq}}$  3 buah lampu yang digunakan sebagai beban sistem non-MPPT mendekati nilai resistansi optimal  $R_{\text{opt}}$ . Oleh karena itu, daya output yang dihasilkan oleh sistem non-MPPT ( $P_{\text{out non-MPPT}}$ ) hampir menyamai daya yang masuk menuju sistem MPPT ANFIS ( $P_{\text{in ANFIS}}$ ) pada pengujian kali ini. Selain itu rugi-rugi daya yang terdapat konverter *buck-boost* salah satu penyebab rendahnya daya yang dihasilkan oleh sistem MPPT ANFIS.

#### 4.4.3 Pengujian dengan beban 4 buah lampu.

Beban yang digunakan adalah 4 buah lampu yang disusun secara seri . Pengujian dilakukan pada pukul 09.00 – 11.00 WIB.

**Tabel 4.8** Perbandingan daya output beban 4 lampu.

No.	MPPT				non-MPPT	Peningkatan
	<i>Duty Cycle</i>	PWM	$P_{in}$ (W)	$P_{out}$ (W)	$P_{out}$ (W)	$P_{out}$ (%)
1.	0,58	146	10,43	8,76	6,28	39,49
2.	0,57	145	9,97	8,18	6,21	31,72
3.	0,58	146	10,64	8,80	6,11	44,03
4.	0,58	147	10,83	9,35	5,86	59,56
5.	0,58	146	10,61	8,58	6,30	36,19
6.	0,58	147	10,83	9,35	5,62	66,37
7.	0,58	146	10,77	9,49	5,51	72,23
8.	0,57	146	10,60	8,88	4,69	89,34
9.	0,57	145	10,48	8,66	7,07	22,49
10.	0,58	148	11,08	9,47	7,01	35,09
11.	0,58	148	10,93	9,32	7,14	30,53
12.	0,58	148	10,71	9,33	6,80	37,21
13.	0,58	148	10,79	8,83	6,97	26,69
14.	0,56	141	8,72	7,87	6,50	21,08
15.	0,56	143	9,37	8,15	6,71	21,46
16.	0,58	148	11,33	9,49	7,16	32,54
17.	0,59	151	11,73	9,56	6,39	49,61
18.	0,57	145	9,86	7,69	6,01	27,95
19.	0,58	147	10,24	7,78	6,18	25,89
20.	0,59	150	10,87	8,58	6,09	40,89
21.	0,59	149	10,92	8,85	5,79	52,85
22.	0,60	152	11,94	9,54	6,38	49,53
23.	0,60	152	11,76	9,92	6,30	57,46
24.	0,60	152	11,79	9,52	6,26	52,08
25.	0,60	153	12,23	9,84	6,23	57,95
<b>Rata-rata peningkatan <math>P_{out}</math></b>						<b>43,21</b>



**Gambar 4.10** Perbandingan  $P_{out}$  MPPT dan non-MPPT beban 4 lampu.

Pengujian dengan 4 buah lampu menunjukkan bahwa sistem MPPT ANFIS mampu menghasilkan peningkatan daya yang cukup signifikan dibandingkan dengan daya yang dihasilkan oleh sistem non-MPPT. Berdasarkan Gambar 4.11 dan Tabel 4.8 secara umum dapat dilihat daya yang masuk menuju sistem MPPT ( $P_{in}$  MPPT) terpaut jauh hampir 2 kali lipat dengan dengan  $P_{out}$  non-MPPT. Peningkatan yang cukup besar ini menyebabkan daya keluaran sistem MPPT ANFIS ( $P_{in}$  MPPT) selalu menghasilkan daya yang jauh lebih besar dibandingkan  $P_{out}$  non-MPPT. Dapat diketahui pula peningkatan daya  $P_{out}$  yang dihasilkan oleh MPPT ANFIS rata-rata sebesar 40,68%. Peningkatan yang cukup signifikan ini disebabkan karena penggunaan beban 4 lampu menghasilkan resistansi ekuivalen  $R_{eq}$  yang jauh dari nilai resistansi optimal  $R_{opt}$ . Akibatnya hampir selama proses pengujian berlangsung sistem non-MPPT tidak mampu mencapai kondisi MPP sehingga menghasilkan daya yang jauh lebih rendah.

Berdasarkan pengujian variasi beban yang telah dilakukan, diketahui bahwa MPPT ANFIS mampu meningkatkan daya keluaran panel fotovoltaik pada nilai resistansi beban yang bervariasi. Pada sistem non-MPPT, daya maksimum dapat diperoleh jika resistansi ekuivalen beban yang digunakan sesuai dengan resistansi optimal  $R_{opt}$ . Pada sistem MPPT ANFIS,

resistansi beban ekuivalen  $R_{eq}$  dapat dicapai secara otomatis dengan mengubah *duty cycle* oleh kontroler ANFIS sehingga daya maksimum dapat selalu diperoleh.

#### 4.5 Pengujian Sistem Dengan Penjejak Matahari

Pada pengujian ini dilakukan integrasi sistem MPPT ANFIS dengan sistem penjejak matahari untuk mengetahui seberapa besar peningkatan daya yang dihasilkan. Pengujian dilakukan menggunakan dua buah panel fotovoltaik 20 Wp dengan konfigurasi satu panel dilengkapi dengan penjejak matahari dan satu panel diletakan tetap (*fixed*). Beban yang digunakan adalah lampu 12V 10W.

##### 4.5.1 Pengujian MPPT ANFIS Pada Sistem Penjejak Matahari

Pada pengujian ini digunakan satu buah modul fotovoltaik yang dilengkapi dengan sistem penjejak matahari. Pengujian ini dilakukan dengan cara membandingkan sistem yang dihubungkan langsung dengan beban (penjejak matahari tanpa MPPT) dan sistem yang dilengkapi dengan MPPT ANFIS (penjejak matahari dengan MPPT). Pengujian dilakukan pada tanggal 4 Januari 2017 pada pukul 09.30; 11.30 dan 14.00.

**Tabel 4.9** Perbandingan daya pada sistem penjejak matahari pukul 09.30

Beban	MPPT		non-MPPT	Peningkatan
	$P_{in}$ (W)	$P_{out}$ (W)	$P_{out}$ (W)	$P_{out}$ (%)
2 Lampu	11,29	10,21	9,47	7,81
3 Lampu	10,31	8,67	8,36	3,71
4 Lampu	9,58	9,22	7,76	18,81

**Tabel 4.10** Perbandingan daya pada sistem penjejak matahari pukul 11.30

Beban	MPPT		non-MPPT	Peningkatan
	$P_{in}$ (W)	$P_{out}$ (W)	$P_{out}$ (W)	$P_{out}$ (%)
2 Lampu	14,67	12,95	10,6	22,17
3 Lampu	9,82	8,39	8,04	4,35
4 Lampu	9,14	7,86	7,11	10,55

**Tabel 4.11** Perbandingan daya pada sistem penjejak matahari pukul 14.00

Beban	MPPT		non-MPPT	Peningkatan
	$P_{in}$ (W)	$P_{out}$ (W)	$P_{out}$ (W)	$P_{out}$ (%)
2 Lampu	13,62	11,41	10,84	5,26
3 Lampu	13,69	8,97	8,49	5,65
4 Lampu	13,53	8,65	7,43	16,42

**Tabel 4.12** Rata-rata peningkatan daya MPPT vs non-MPPT pada penjejak matahari

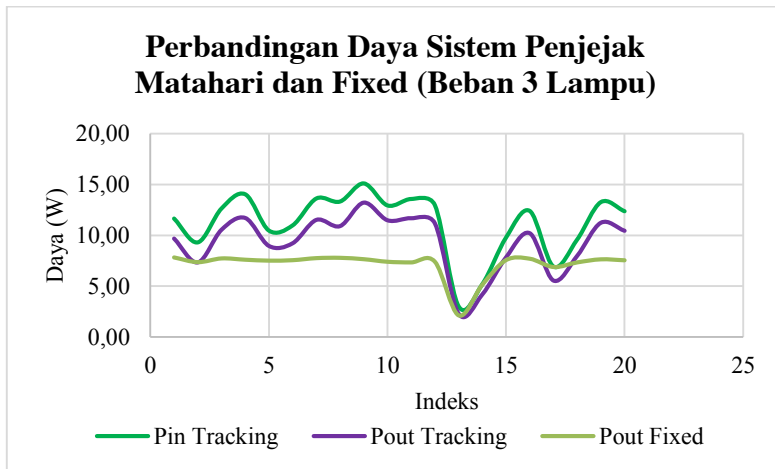
Beban	Peningkatan $P_{out}$ (%)			Rata-rata (%)
	Pada Pukul			
	09.30	11.30	14.00	
2 Lampu	7,81	22,17	5,26	11,75
3 Lampu	3,71	4,35	5,65	4,57
4 Lampu	18,81	10,55	16,42	15,26

Berdasarkan hasil pengujian yang dilakukan dengan beban yang bervariasi dan waktu yang berbeda-beda dapat diketahui bahwa MPPT ANFIS mampu meningkatkan daya keluaran modul fotovoltaik yang telah dilengkapi oleh sistem penjejak matahari. Pada sistem MPPT ANFIS daya yang dikeluarkan modul fotovoltaik ( $P_{in}$  MPPT) dapat mencapai 14,67 Watt dengan daya yang dikeluarkan menuju beban ( $P_{out}$  MPPT) sebesar 12,95 Watt pada pukul 11.30 dengan beban 2 lampu. Pada kondisi yang sama, sistem non-MPPT hanya mampu menghasilkan daya sebesar 10,6 Watt. Berdasarkan Tabel 4.9, Tabel 4.10 dan Tabel 4.11 peningkatan paling rendah terjadi pada beban 3 buah lampu untuk

waktu yang berbeda. Hal ini sesuai dengan hasil pengujian pada Subbab 4.4 bahwa pada beban 3 lampu resistansi ekuivalen  $R_{eq}$  hampir mendekati resistansi optimum  $R_{opt}$  sehingga kondisi MPP dapat tercapai tanpa memerlukan MPPT. Pada Tabel 4.12 ditunjukan rata-rata peningkatan daya yang terjadi adalah 11,75% untuk beban 2 lampu, 4,57% untuk beban 3 lampu, dan 15,26% untuk beban 4 lampu.

#### 4.5.2 Pengujian Sistem Penjejak Matahari MPPT ANFIS dan Sistem *Fixed non-MPPT*.

Pengujian dilakukan dengan menggunakan modul fotovoltaik tanpa dilengkapi apapun (*fixed non-MPPT*) dan modul fotovoltaik yang telah dilengkapi sistem penjejak matahari dan MPPT ANFIS. Pengujian dilakukan dengan beban 3 buah lampu. Pengambilan data dilakukan pada tanggal 5 Januari 2017 pukul 11.00 – 13.00.



**Gambar 4.11** Perbandingan daya sistem penjejak matahari MPPT ANFIS dan *fixed*.



**Tabel 4.13** Perbandingan daya sistem penjejak matahari MPPT ANFIS dan *fixed* non-MPPT.

No.	Penjejak Matahari MPPT ANFIS		<i>Fixed</i>	Peningkatan
	$P_{in}$ (W)	$P_{out}$ (W)	$P_{out}$ (W)	$P_{out}$ (%)
1.	11,65	9,67	7,84	23,38
2.	9,31	7,33	7,38	-0,63
3.	12,64	10,54	7,74	36,12
4.	14,03	11,70	7,62	53,57
5.	10,47	8,95	7,52	18,94
6.	10,98	9,21	7,57	21,69
7.	13,62	11,51	7,77	48,11
8.	13,32	10,90	7,80	39,70
9.	15,10	13,20	7,67	72,24
10.	12,94	11,47	7,41	54,72
11.	13,57	11,67	7,35	58,76
12.	12,96	11,16	7,42	50,53
13.	3,03	2,28	2,15	6,40
14.	5,21	4,18	5,16	-18,91
15.	9,78	7,82	7,58	3,28
16.	12,40	10,20	7,71	32,26
17.	6,94	5,55	6,90	-19,58
18.	9,59	7,97	7,35	8,45
19.	13,26	11,22	7,65	46,66
20.	12,36	10,44	7,56	38,13
<b>Rata-rata peningkatan <math>P_{out}</math></b>				<b>28,69</b>

Dari data yang tersaji pada Tabel 4.13 dapat diketahui bahwa sistem penjejak matahari MPPT ANFIS mampu meningkatkan perolehan daya output rata-rata hingga 28,69 % dengan menggunakan beban 3 buah lampu. Peningkatan daya ini relatif lebih rendah apabila mengacu pada hasil penelitian sebelumnya mengenai sistem penjejak matahari tanpa MPPT yang mampu meningkatkan perolehan daya rata-rata hingga 30% [3]. Pengambilan data pada penelitian tersebut dilakukan pada bulan

Mei-Juni bertepatan dengan musim kemarau. Sedangkan pada penelitian ini pengambilan data dilakukan pada bulan November – Desember yang bertepatan dengan musim penghujan. Perbedaan kondisi iklim ini tentu saja akan sangat berpengaruh pada daya yang dihasilkan oleh panel fotovoltaik selama proses pengambilan data. Oleh karena itu, perlu dilakukan studi lebih lanjut dimana proses pengambilan data dilakukan pada kondisi iklim yang sama sehingga perbandingan dapat dilakukan tanpa bias.

Terdapat kondisi dimana peningkatan daya output bernilai negatif. Hal ini disebabkan karena saat pengambilan data kondisi iklim belfluktuatif (berawan dan berangin) sehingga pada saat tertentu terdapat kondisi iklim yang dapat menyebabkan sistem *fixed* mencapai kondisi MPP dengan sendirinya. Selain itu apabila ditelaah lebih lanjut pada Tabel 4.13 diketahui bahwa daya yang masuk pada sistem MPPT ( $P_{in}$  MPPT) selalu relatif lebih besar dibandingkan daya keluaran  $P_{out}$  sistem *fixed*. Ini mengindikasikan bahwa MPPT ANFIS telah mampu mengoptimalkan daya keluaran panel fotovoltaik. Namun, akibat adanya rugi-rugi pada konverter *buck-boost* menyebabkan daya yang tersalurkan menuju beban ( $P_{out}$  MPPT) menjadi berkurang secara signifikan bahkan lebih rendah dari daya yang diperoleh dari sistem *fixed*.

Pada sistem penjejak matahari MPPT ANFIS, setiap subsistem memiliki peranan masing-masing dalam upaya untuk meningkatkan daya output fotovoltaik. Subsistem penjejak matahari berperan untuk selalu menghadapkan modul fotovoltaik tepat pada arah datang sinar matahari sehingga modul selalu terpapar radiasi matahari secara maksimum. Meningkatnya radiasi matahari akan meningkatkan nilai arus hubung singkat (*short circuit current*,  $I_{sc}$ ) modul. Akibatnya daya yang dihasilkan oleh modul pun akan meningkat. Akan tetapi, daya yang dihasilkan oleh modul fotovoltaik dipengaruhi beban yang digunakan. Subsistem MPPT ANFIS berperan untuk mengekstrak daya maksimum yang mungkin dari modul fotovoltaik berdasarkan penelusuran titik daya maksimum atau *maximum power point* (MPP) pada kurva karakteristik I-V fotovoltaik. MPPT ANFIS memastikan modul fotovoltaik agar selalu mengeluarkan daya maksimum yang

mungkin pada kondisi klimatik tertentu. Berdasarkan pengujian yang telah dilakukan, MPPT ANFIS juga mampu meningkatkan daya keluaran pada beban yang berbeda.

***“Halaman ini memang dikosongkan”***

## **BAB V**

### **PENUTUP**

#### **5.1 Kesimpulan**

Berdasarkan penelitian dan analisis yang telah dilaksanakan diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

- Telah berhasil dirancang MPPT berbasis ANFIS pada sistem penjejak matahari dengan input berupa error yaitu selisih antara tegangan modul fotovoltaik dengan *setpoint*  $V_{MPP}$  dan delta error yaitu selisih error saat ini dan sebelumnya. Nilai  $V_{MPP}$  diperoleh berdasarkan *open-voltage method*.
- MPPT ANFIS yang telah dirancang mampu meningkatkan daya output fotovoltaik relatif terhadap sistem non-MPPT pada sistem penjejak matahari. Peningkatan daya rata-rata relatif terhadap sistem non-MPPT adalah 11,75% untuk beban 2 lampu; 4,57% untuk beban 3 lampu, dan 15,26% untuk beban 4 lampu. Selain itu diperoleh peningkatan daya pada sistem penjejak matahari MPPT ANFIS sebesar 26,69% relatif terhadap sistem *fixed* dengan beban 3 lampu.

#### **5.2 Saran**

Beberapa saran yang diberikan untuk pengembangan selanjutnya pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

- Menggunakan komponen-komponen dengan kualitas lebih baik dan memperhatikan jalur koneksi antar komponen pada konverter DC-DC sehingga dapat mengurangi rugi-rugi daya pada konverter.
- Pemilihan pasangan data input-output untuk pelatihan ANFIS perlu diperhatikan sedemikian rupa sehingga data yang digunakan sepenuhnya representatif terhadap sistem yang akan dimodelkan.
- Melengkapi MPPT dengan sistem *battery charge controller* sehingga daya listrik yang dihasilkan modul fotovoltaik dapat disimpan dengan aman pada baterai.

***“Halaman ini memang dikosongkan”***

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Veldhuis, A., & Reinders, A. (2015). Reviewing the potential and cost-effectiveness of off-grid PV systems in Indonesia on a provincial level . *Renewable and Sustainable Energy Reviews* , 52, 757–769.
- [2] Tito, B. (2012). *Metode MPPT Baru untuk Sel Surya Berdasarkan Pengendali PI*. Universitas Indonesia, Teknik Elektro. Depok: Universitas Indonesia.
- [3] Birilianti, N. (2015). *Implementasi Kontrol Fuzzy Pada Sistem Penjejak Matahari Aktif Dua Derajat Kebebasan Untuk Meningkatkan Penerimaan Energi Matahari Photovoltaic*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, Teknik Fisika. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya
- [4] Villalva, M. G., Gazoli, J. R., & Filho, E. R. (2009). Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays. *IEEE Transaction On Power Electronics*, 24, 1198-1208
- [5] Kolsi, S., Samet, H., & Amar, M. Ben. (2014). Design Analysis of DC-DC Converters Connected to a Photovoltaic Generator and Controlled by MPPT for Optimal Energy Transfer throughout a Clear Day. *Journal of Power and Energy Engineering*, 2(1), 27–34.
- [6] Dolara, a., Faranda, R., & Leva, S. (2009). Energy Comparison of Seven MPPT Techniques for PV Systems. *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications*, 1(3), 152–162.
- [7] Karanjkar, D. S., Chatterji, S., L, S. S., & Kumar, A. (2014). Real Time Simulation and Analysis of Maximum Power Point Tracking (MPPT) Techniques for Solar Photo-Voltaic System. *2014 Recent Advances Engineering and Computational Sciences (RAECS)* (pp. 1-6). Chandigarh: IEEE.
- [8] Ahmad, J. (2010). A Fractional Open Circuit Voltage Based Maximum Power Point Tracker for Photovoltaic

Arrays. *2nd International Conference on Software Technology and Engineering (ICSTE)*, V1-247 - V1-250

- [9] Murdianto., F., Panangsang, O., & Priyadi, A. (2015). Modelling and Simulation of MPPT-Bidirectional Using Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (ANFIS) in Distributed Energy Generation System. *2015 International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA)* (pp. 207 - 212 ). Surabaya: IEEE.
- [10] Bin-halabi, A., Abdenmour, A., & Mashaly, H. (2014). An Accurate ANFIS-based MPPT for Solar PV System. *International Journal of Advanced Computer Research*, 4(15), 588–595.
- [11] Eltawil, M. A., & Zhao, Z. (2013). MPPT techniques for photovoltaic applications . *Renewable and Sustainable Energy Reviews* , 25, 793-813.
- [12] Muhammad, Amar dkk. 2012. Rancang Bangun Sistem Penjejak Matahari 2 Sumbu Berbasis Kontrol *Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System* (ANFIS). Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- [13] Santoso, H. E., & Musyafa', A. (2016). *Implementasi Kontrol Dual Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) Pada Sistem Penjejak Matahari Dua Posisi Untuk Meningkatkan Performansi Photovoltaic*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, Teknik Fisika. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.
- [14] Duran, E., Sidrach-de-Cordona, M., Galan, J., & Andujar, J. M. (2008). Comparative Analysis of Buck-Boost Converters used to obtain I-V Characteristic Curves of Photovoltaic Modules. *IEEE Power Electronics Specialists Conference* (pp. 2036-2042). IEEE.
- [15] Putro, B. I. (2014). *Rancang Bangun DC-DC Buck Boost Converter Berbasis Arduino Pada Mini Plant Solar Tracking System*. D3 Metrologi dan Instrumentasi. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.



- [16] Putra, B. P., Aisjah, A. S., & Arifin, S. (2013). Rancang Bangun Maximum Power Point Tracking pada Panel Photovoltaic Berbasis Logika Fuzzy di Buoy Weather Station. *Jurnal Teknik POMITS*, 2, 299-304.
- [17] Altas, I. H., & Sharaf, A. M. (2007). A Generalized Direct Approach for Designing Fuzzy Logic Controllers in Matlab/Simulink Gui Environment. *International Journal of Information Technology and Intelligent Computing*, 1(4).
- [18] Desraino, A. (2016). *Desain Maximum Power Point Tracking (MPPT) Solar Charge Controller Menggunakan Buck Converter Dengan Metode Logika Fuzzy di Buoy Weather Station*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Teknik Fisika. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember

***“Halaman ini memang dikosongkan”***

## LAMPIRAN A

**Tabel A.1** Hasil pengujian sistem MPPT ANFIS beban 2 lampu  
(tanpa penjejak matahari).

No.	V <sub>in</sub> (V)	I <sub>in</sub> (I)	V <sub>out</sub> (V)	I <sub>out</sub> (A)	<i>Duty Cycle</i>	PWM
1.	14,17	0,82	17,26	0,53	0,54	137
2.	14,07	0,89	18,04	0,55	0,55	138
3.	13,98	0,83	17,21	0,53	0,54	137
4.	13,98	0,90	18,08	0,53	0,55	140
5.	13,91	0,90	18,04	0,55	0,55	139
6.	13,84	0,86	17,46	0,54	0,54	138
7.	14,09	0,87	17,89	0,56	0,54	138
8.	14,01	0,87	17,69	0,54	0,54	138
9.	14,08	0,89	18,08	0,56	0,55	139
10.	14,06	0,87	17,88	0,55	0,54	137
11.	12,48	0,19	6,02	0,24	0,31	79
12.	12,16	0,16	5,40	0,26	0,30	75
13.	12,76	0,37	9,73	0,35	0,42	106
14.	13,25	0,21	6,91	0,29	0,33	83
15.	13,10	0,18	6,00	0,27	0,30	76
16.	13,55	0,34	9,50	0,36	0,40	101
17.	13,48	0,31	9,03	0,34	0,39	98
18.	12,26	0,17	5,60	0,24	0,30	75
19.	14,12	0,46	12,01	0,39	0,44	112
20.	13,94	0,27	8,42	0,33	0,36	90
21.	13,22	0,21	6,93	0,30	0,32	82
22.	13,32	0,23	7,29	0,31	0,34	86
23.	12,65	0,19	6,25	0,29	0,32	80
24.	12,98	0,21	6,78	0,29	0,33	83
25.	13,22	0,21	6,91	0,29	0,33	83

**Tabel A.2** Hasil pengujian sistem non-MPPT beban 2 lampu  
(tanpa penjejak matahari).

<b>No.</b>	<b>V<sub>out</sub> (V)</b>	<b>I<sub>out</sub> (A)</b>	<b>P<sub>out</sub> (V)</b>
<b>1.</b>	16,35	0,52	8,50
<b>2.</b>	16,47	0,54	8,91
<b>3.</b>	16,27	0,56	9,07
<b>4.</b>	16,46	0,56	9,22
<b>5.</b>	16,42	0,53	8,71
<b>6.</b>	16,25	0,53	8,55
<b>7.</b>	16,33	0,53	8,73
<b>8.</b>	16,35	0,55	8,93
<b>9.</b>	16,39	0,54	8,90
<b>10.</b>	16,33	0,53	8,60
<b>11.</b>	3,51	0,25	0,88
<b>12.</b>	2,23	0,21	0,46
<b>13.</b>	10,74	0,43	4,62
<b>14.</b>	4,12	0,27	1,11
<b>15.</b>	2,87	0,24	0,70
<b>16.</b>	9,21	0,39	3,60
<b>17.</b>	7,88	0,38	2,97
<b>18.</b>	2,37	0,23	0,54
<b>19.</b>	12,14	0,43	5,19
<b>20.</b>	5,91	0,33	1,95
<b>21.</b>	3,60	0,25	0,91
<b>22.</b>	4,10	0,26	1,08
<b>23.</b>	2,99	0,26	0,78
<b>24.</b>	3,56	0,26	0,93
<b>25.</b>	3,70	0,25	0,94

**Tabel A.3** Hasil pengujian sistem MPPT ANFIS beban 3 lampu (tanpa penjejak matahari).

<b>No.</b>	<b>V<sub>in</sub> (V)</b>	<b>I<sub>in</sub> (I)</b>	<b>V<sub>out</sub> (V)</b>	<b>I<sub>out</sub> (A)</b>	<b>Duty Cycle</b>	<b>PWM</b>
<b>1.</b>	14,20	0,43	13,40	0,33	0,47	119
<b>2.</b>	14,57	0,49	14,89	0,38	0,48	123
<b>3.</b>	14,65	0,51	15,36	0,39	0,49	125
<b>4.</b>	14,34	0,41	13,28	0,35	0,46	117
<b>5.</b>	14,58	0,44	14,02	0,37	0,47	120
<b>6.</b>	14,79	0,48	15,19	0,38	0,49	123
<b>7.</b>	14,43	0,52	15,61	0,40	0,49	125
<b>8.</b>	14,73	0,61	17,45	0,41	0,52	132
<b>9.</b>	14,57	0,64	17,88	0,42	0,53	133
<b>10.</b>	14,50	0,64	17,84	0,42	0,52	133
<b>11.</b>	14,58	0,62	17,50	0,43	0,52	133
<b>12.</b>	14,56	0,59	17,10	0,43	0,51	130
<b>13.</b>	13,38	0,13	6,09	0,24	0,25	63
<b>14.</b>	15,91	0,43	14,86	0,40	0,46	116
<b>15.</b>	14,49	0,50	15,46	0,39	0,49	124
<b>16.</b>	12,62	0,13	6,05	0,23	0,27	67
<b>17.</b>	14,56	0,48	14,95	0,40	0,48	121
<b>18.</b>	15,01	0,38	13,18	0,37	0,44	112
<b>19.</b>	14,62	0,46	14,67	0,39	0,48	122
<b>20.</b>	14,29	0,32	11,53	0,36	0,42	106
<b>21.</b>	12,46	0,18	7,40	0,27	0,32	80
<b>22.</b>	11,80	0,18	7,00	0,26	0,32	80
<b>23.</b>	11,94	0,17	6,79	0,25	0,31	77
<b>24.</b>	11,22	0,16	6,28	0,23	0,31	78
<b>25.</b>	11,26	0,15	6,13	0,25	0,30	76

**Tabel A.4** Hasil pengujian sistem non-MPPT beban 3 lampu  
(tanpa penjejak matahari).

<b>No.</b>	<b>V<sub>out</sub> (V)</b>	<b>I<sub>out</sub> (A)</b>	<b>P<sub>out</sub> (V)</b>
<b>1.</b>	17,11	0,42	7,13
<b>2.</b>	17,35	0,42	7,22
<b>3.</b>	17,14	0,42	7,15
<b>4.</b>	16,34	0,41	6,75
<b>5.</b>	16,69	0,41	6,88
<b>6.</b>	17,56	0,42	7,45
<b>7.</b>	17,24	0,44	7,60
<b>8.</b>	17,60	0,44	7,68
<b>9.</b>	17,59	0,43	7,65
<b>10.</b>	17,58	0,43	7,63
<b>11.</b>	17,50	0,43	7,58
<b>12.</b>	17,31	0,44	7,57
<b>13.</b>	3,11	0,20	0,61
<b>14.</b>	16,95	0,43	7,32
<b>15.</b>	17,04	0,43	7,25
<b>16.</b>	2,90	0,19	0,56
<b>17.</b>	16,92	0,43	7,29
<b>18.</b>	15,88	0,43	6,85
<b>19.</b>	16,88	0,43	7,33
<b>20.</b>	13,82	0,40	5,51
<b>21.</b>	6,42	0,27	1,76
<b>22.</b>	4,61	0,23	1,08
<b>23.</b>	4,11	0,24	0,97
<b>24.</b>	4,59	0,23	1,05
<b>25.</b>	3,51	0,22	0,76

**Tabel A.5** Hasil pengujian sistem MPPT ANFIS beban 4 lampu (tanpa penjejak matahari).

<b>No.</b>	<b>Vin (V)</b>	<b>Iin (I)</b>	<b>Vout (V)</b>	<b>Iout (A)</b>	<b>Duty Cycle</b>	<b>PWM</b>
<b>1.</b>	14,39	0,73	21,09	0,42	0,58	146
<b>2.</b>	14,33	0,70	20,51	0,40	0,57	145
<b>3.</b>	14,40	0,74	21,47	0,41	0,58	146
<b>4.</b>	14,49	0,75	21,56	0,43	0,58	147
<b>5.</b>	14,48	0,73	21,24	0,40	0,58	146
<b>6.</b>	14,48	0,75	21,54	0,43	0,58	147
<b>7.</b>	14,39	0,75	21,46	0,44	0,58	146
<b>8.</b>	14,42	0,73	21,20	0,42	0,57	146
<b>9.</b>	14,34	0,73	21,07	0,41	0,57	145
<b>10.</b>	14,49	0,76	21,86	0,43	0,58	148
<b>11.</b>	14,37	0,76	21,68	0,43	0,58	148
<b>12.</b>	14,42	0,74	21,45	0,44	0,58	148
<b>13.</b>	14,31	0,75	21,57	0,41	0,58	148
<b>14.</b>	14,04	0,62	18,88	0,42	0,56	141
<b>15.</b>	14,13	0,66	19,83	0,41	0,56	143
<b>16.</b>	14,54	0,78	22,26	0,43	0,58	148
<b>17.</b>	14,24	0,82	22,61	0,42	0,59	151
<b>18.</b>	14,15	0,70	20,38	0,38	0,57	145
<b>19.</b>	14,13	0,72	20,68	0,38	0,58	147
<b>20.</b>	14,14	0,77	21,62	0,40	0,59	150
<b>21.</b>	14,17	0,77	21,60	0,41	0,59	149
<b>22.</b>	14,24	0,84	22,79	0,42	0,60	152
<b>23.</b>	14,27	0,82	22,59	0,44	0,60	152
<b>24.</b>	14,10	0,84	22,64	0,42	0,60	152
<b>25.</b>	14,04	0,87	23,09	0,43	0,60	153

**Tabel A.6** Hasil pengujian sistem non-MPPT beban 4 lampu  
(tanpa penjejak matahari).

<b>No.</b>	<b>V<sub>out</sub> (V)</b>	<b>I<sub>out</sub> (A)</b>	<b>P<sub>out</sub> (V)</b>
<b>1.</b>	17,39	0,36	6,28
<b>2.</b>	17,37	0,36	6,21
<b>3.</b>	17,48	0,35	6,11
<b>4.</b>	17,39	0,34	5,86
<b>5.</b>	17,22	0,37	6,30
<b>6.</b>	17,10	0,33	5,62
<b>7.</b>	16,89	0,33	5,51
<b>8.</b>	14,27	0,33	4,69
<b>9.</b>	17,66	0,40	7,07
<b>10.</b>	17,64	0,40	7,01
<b>11.</b>	17,47	0,41	7,14
<b>12.</b>	17,28	0,39	6,80
<b>13.</b>	17,28	0,4	6,97
<b>14.</b>	16,91	0,38	6,5
<b>15.</b>	17,25	0,39	6,71
<b>16.</b>	17,60	0,41	7,16
<b>17.</b>	17,10	0,37	6,39
<b>18.</b>	16,70	0,36	6,01
<b>19.</b>	16,78	0,37	6,18
<b>20.</b>	16,94	0,36	6,09
<b>21.</b>	16,94	0,34	5,79
<b>22.</b>	17,11	0,37	6,38
<b>23.</b>	16,95	0,37	6,30
<b>24.</b>	17,02	0,37	6,26
<b>25.</b>	16,90	0,37	6,23



## LAMPIRAN B

**Tabel B.1** Uji naik pembacaan sensor tegangan INA219.

Vin (V)	Uji Naik (V)					Rata-rata (V)
	1	2	3	4	5	
1.00	1.08	1.07	1.05	1.08	1.06	1.07
2.00	2.02	2.00	2.00	2.02	2.05	2.02
3.00	3.06	3.04	3.07	3.02	3.04	3.05
4.00	4.07	4.08	4.02	4.03	4.04	4.05
5.00	5.00	5.03	5.03	5.02	5.02	5.02
6.00	6.06	6.05	6.04	6.02	6.00	6.03
7.00	7.01	7.02	7.01	7.04	7.02	7.02
8.00	8.01	8.02	8.04	8.01	8.00	8.02
9.00	9.03	9.01	9.03	9.03	9.06	9.03
10.00	10.04	10.02	10.02	10.05	10.01	10.03
11.00	11.03	11.00	11.02	11.01	11.01	11.01
12.00	12.00	12.00	12.01	12.03	12.04	12.02
13.00	13.05	13.04	13.06	13.05	13.04	13.05
14.00	14.06	14.04	14.00	14.02	14.01	14.03
15.00	15.02	15.00	15.03	15.04	15.02	15.02
16.00	16.00	16.06	16.05	16.04	16.04	16.04
17.00	17.06	17.03	17.00	17.02	17.01	17.02
18.00	18.00	18.00	17.99	18.03	18.04	18.01
19.00	19.06	19.04	19.04	19.01	19.00	19.03
20.00	20.00	19.99	19.98	20.01	19.96	19.99
21.00	20.98	20.97	21.02	21.03	21.02	21.00
22.00	21.97	22.04	22.00	22.01	22.03	22.01
23.00	22.98	22.98	23.06	23.04	22.99	23.01
24.00	23.98	24.00	24.01	23.96	24.02	23.99
25.00	24.97	25.01	24.96	24.93	24.94	24.96

**Tabel B.2** Uji turun pembacaan sensor tegangan INA219.

Vin (V)	Uji Turun (V)					Rata-rata (V)
	1	2	3	4	5	
1.00	1.07	1.06	1.06	1.06	1.05	1.06
2.00	2.02	2.02	2.05	2.05	2.04	2.04
3.00	3.07	3.07	3.05	3.04	3.02	3.05
4.00	4.01	4.02	4.02	4.02	4.01	4.02
5.00	5.03	5.04	5.04	5.06	5.04	5.04
6.00	6.04	6.00	6.02	6.00	6.04	6.02
7.00	7.02	7.03	7.04	7.00	7.03	7.02
8.00	8.02	7.99	7.97	8.09	8.06	8.03
9.00	9.08	9.08	9.09	9.08	9.09	9.08
10.00	10.02	9.99	10.06	10.06	10.06	10.04
11.00	11.04	10.94	11.08	11.08	11.07	11.04
12.00	12.00	11.98	12.01	11.99	11.98	11.99
13.00	13.01	13.02	13.04	13.05	13.07	13.04
14.00	14.04	14.04	14.05	14.05	14.03	14.04
15.00	14.97	14.99	15.00	15.04	15.02	15.00
16.00	15.99	16.00	15.97	16.01	16.02	16.00
17.00	17.02	17.00	17.00	16.97	16.94	16.99
18.00	17.93	17.94	17.92	17.93	17.99	17.94
19.00	18.97	18.97	18.94	18.95	18.96	18.96
20.00	19.97	20.02	19.95	20.00	20.01	19.99
21.00	21.01	20.98	20.98	20.94	20.94	20.97
22.00	22.00	22.01	22.97	22.03	22.02	22.21
23.00	23.01	23.03	22.99	22.95	22.93	22.98
24.00	23.95	23.95	24.04	24.02	24.01	23.99
25.00	24.97	24.99	24.93	24.99	25.00	24.98

**Tabel B.3** Rata-rata pembacaan sensor tegangan INA219.

<b>V<sub>in</sub> (V)</b>	<b>Rata-rata Naik (V)</b>	<b>Rata-rata Turun (V)</b>	<b>Rata-rata (V)</b>
1.00	1.07	1.06	1.06
2.00	2.02	2.04	2.03
3.00	3.05	3.05	3.05
4.00	4.05	4.02	4.03
5.00	5.02	5.04	5.03
6.00	6.03	6.02	6.03
7.00	7.02	7.02	7.02
8.00	8.02	8.03	8.02
9.00	9.03	9.08	9.06
10.00	10.03	10.04	10.03
11.00	11.01	11.04	11.03
12.00	12.02	11.99	12.00
13.00	13.05	13.04	13.04
14.00	14.03	14.04	14.03
15.00	15.02	15.00	15.01
16.00	16.04	16.00	16.02
17.00	17.02	16.99	17.01
18.00	18.01	17.94	17.98
19.00	19.03	18.96	18.99
20.00	19.99	19.99	19.99
21.00	21.00	20.97	20.99
22.00	22.01	22.21	22.11
23.00	23.01	22.98	23.00
24.00	23.99	23.99	23.99
25.00	24.96	24.98	24.97

**Tabel B.4** Uji naik pembacaan sensor arus INA219.

<b>Iin (mA)</b>	<b>Uji Naik (mA)</b>					<b>Rata-rata (mA)</b>
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	
100	117	116	109	92	91	105
150	164	163	163	164	163	163
200	218	215	216	217	217	217
250	264	264	266	265	263	264
300	310	308	316	314	311	312
350	360	362	360	365	368	363
400	412	410	411	411	410	411
450	463	462	461	463	464	463
500	512	512	511	507	509	510
550	562	561	561	559	558	560
600	610	611	610	608	608	609
650	657	656	656	658	656	657
700	706	706	706	707	707	706
750	760	770	760	760	760	762
800	810	820	820	820	820	818
850	880	870	870	860	870	870
900	920	910	910	920	920	916
950	970	960	960	970	960	964
1000	1010	1010	1010	1010	1010	1010
1050	1060	1070	1070	1060	1060	1064
1100	1110	1100	1110	1100	1100	1104
1150	1150	1150	1160	1160	1150	1154
1200	1210	1210	1210	1200	1200	1206
1250	1260	1250	1250	1250	1250	1252
1300	1310	1310	1310	1310	1310	1310
1350	1360	1350	1350	1360	1360	1356
1400	1410	1410	1410	1400	1410	1408
1450	1450	1450	1450	1450	1450	1450
1500	1520	1500	1500	1500	1500	1504

**Tabel B.5** Uji turun pembacaan sensor arus INA219.

Iin (mA)	Uji Turun (mA)					Rata-rata (mA)
	1	2	3	4	5	
100	113	114	117	116	118	116
150	162	166	165	166	168	165
200	210	210	211	210	211	210
250	260	261	262	262	261	261
300	315	312	311	311	314	313
350	361	360	360	359	358	360
400	415	414	413	411	409	412
450	460	461	460	459	461	460
500	511	512	510	509	508	510
550	559	558	557	557	558	558
600	610	611	611	610	611	611
650	655	656	656	656	656	656
700	705	706	707	708	708	707
750	760	760	750	750	760	756
800	810	810	810	810	810	810
850	860	860	860	860	860	860
900	910	910	910	910	910	910
950	960	960	970	960	960	962
1000	1010	1010	1010	1010	1010	1010
1050	1060	1060	1060	1060	1060	1060
1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100
1150	1160	1160	1160	1160	1150	1158
1200	1210	1210	1210	1210	1210	1210
1250	1260	1250	1260	1250	1250	1254
1300	1310	1300	1300	1300	1310	1304
1350	1350	1350	1360	1360	1360	1356
1400	1410	1400	1410	1410	1410	1408
1450	1450	1460	1450	1450	1450	1452
1500	1520	1500	1500	1500	1500	1504

**Tabel B.6** Rata-rata pembacaan sensor arus INA219.

<b>Iin (mA)</b>	<b>Rata-rata Naik (mA)</b>	<b>Rata-rata Turun (mA)</b>	<b>Rata-rata (mA)</b>	<b>Rata-rata (A)</b>
100	105	116	110	0.11
150	163	165	164	0.16
200	217	210	214	0.21
250	264	261	263	0.26
300	312	313	312	0.31
350	363	360	361	0.36
400	411	412	412	0.41
450	463	460	461	0.46
500	510	510	510	0.51
550	560	558	559	0.56
600	609	611	610	0.61
650	657	656	656	0.66
700	706	707	707	0.71
750	762	756	759	0.76
800	818	810	814	0.81
850	870	860	865	0.87
900	916	910	913	0.91
950	964	962	963	0.96
1000	1010	1010	1010	1.01
1050	1064	1060	1062	1.06
1100	1104	1100	1102	1.10
1150	1154	1158	1156	1.16
1200	1206	1210	1208	1.21
1250	1252	1254	1253	1.25
1300	1310	1304	1307	1.31
1350	1356	1356	1356	1.36
1400	1408	1408	1408	1.41
1450	1450	1452	1451	1.45
1500	1504	1504	1504	1.50

## LAMPIRAN C

### *Listing Program MPPT ANFIS*

```
#include <PWM.h>
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_INA219.h>

#define k 0.75
#define cek 120000      // rentang waktu utk update Vmpp
#define cek2 5000       // rentang waktu utk catat data

Adafruit_INA219 ina219;
int32_t frequency = 25000; // frequency (in Hz)
unsigned long awal = 0;
unsigned long catat = 0;
char tmp[25];
int mulai = 1;
int mulai2 = 1;
int PWMD = 0;
int PWM = 0;
int A = 0;
float panelVolts = 0;
float voltage = 0;
float current = 0;
float panelWatts = 0;
float lastpanelVolts = 0;
float maxwatts = 0;
float vmpp = 0;
float elast = 0;
float e = 0;
float de = 0;
float voc = 0;
int b = 1;
int c = 1;
float output = 0;
float D = 0;
```

float output\_last = 0.7; // nilai 0.7059 utk mulai penjejakan dari  
kondisi Short-Circuit

// nilai 0 utk mulai penjejakan dari kondisi

Open-Circuit

//===== SET-UP

=====

//=====

=====

void setup()

{

InitTimersSafe();

bool success = SetPinFrequencySafe(11, frequency);

if(success) {

pinMode(13,OUTPUT);

digitalWrite(13,HIGH);

}

Serial.begin(115200);

Serial.println("CLEARDATA");

Serial.println("LABEL,Time,Vmpp,Vin\_m,Iin\_m,Pin\_m,Pmax,V

out\_m,Iout\_m,Pout\_m,Vfix,Ifix,Pfix,dD,Duty,PWM");

ina219.begin();

}

//===== L O O P

=====

//=====

=====

void loop()

{

ref = readVcc()/1000.0;



```

// input voltage sensor
panelVolts = 0;
for(int i=0;i<5;i++){
    panelVolts += ina219.getBusVoltage_V();
}

// input current sensor
current = 0;
for(int i=0;i<5;i++){
    current += ina219.getCurrent_mA()/1000;
}

panelVolts = panelVolts/5;
lastpanelVolts = panelVolts;
current = current/5;
panelWatts = (panelVolts * current);
maxwatts = max(maxwatts, panelWatts); //calculate the max
watts

// raw output current
it = 0;
for(int i=0;i<10;i++){
    it += analogRead(A2);
}
it = it/10;

// raw output voltage
vt = 0;
for(int i=0;i<10;i++){
    vt += analogRead(A5);
}
vt = vt/10;

// raw output current (fixed)
ifxx = 0;

```

```

for(int i=0;i<10;i++){
    ifxx += analogRead(A6);
}
ifxx = ifxx/10;

//raw output voltage (fixed)
vfx = 0;
for(int i=0;i<10;i++){
    vfx += analogRead(A7);
}
vfx = vfx/10;

// output current
itr = (it * (ref / 1024.0) * -1.2548) + 3.1025;
// output voltage
vtr = -0.0387 * vt + 32.504;
//if (vtr > 0){vtr = 0;}
// output power
daytr = itr * vtr;
// output current (fixed)
ifx = (ifxx * (ref / 1024.0) * -0.7362 + 1.9942);
// output voltage (fixed)
vfx = (0.0235 * vfx) - 0.1062;
//if (vfx < 0){vfx = 0;}
// output power (fixed)
dayfx = ifx * vfx;

setpoint(); // update Vmpp

//PWMD = analogRead(A1);
//PWMD = constrain (PWMD, 0, 712);
//A = map(PWMD,0,1023,0,100);

e = panelVolts-vmpp; // error =Vpv - Vmpp
de = e - elast; // delta error
elast = e;

```

```

//-----Layer 1-----
//error MF param
//sige1 sige2 sige3 sige4 sige5
//ce1 ce2 ce3 ce4 ce5
float sige1 = 2.521; float sige2 = 3.443; float sige3 = 3.217;
float sige4 = 3.271; float sige5 = 3.059;
float ce1 = -18.49; float ce2 = -10.99; float ce3 = -3.806;
float ce4 = 3.404; float ce5 = 10.9;

//derror MF param
//sigde1 sigde2 sigde3 sigde4 sigde5
//cde1 cde2 cde3 cde4 cde5
float sigde1 = 3.07; float sigde2 = 3.07; float sigde3 = 3.069;
float sigde4 = 3.07; float sigde5 = 3.07;
float cde1 = -17.99; float cde2 = -10.76; float cde3 = -3.536;
float cde4 = 3.693; float cde5 = 10.92;

//gauss eq = exp(-((x-c)^2)/(sig^2)) "x=input; sig=devst;
c=center"
//fuzzy set error
float nume1 = pow(e-ce1,2); float dene1 = pow(sige1,2);
float nume2 = pow(e-ce2,2); float dene2 = pow(sige2,2);
float nume3 = pow(e-ce3,2); float dene3 = pow(sige3,2);
float nume4 = pow(e-ce4,2); float dene4 = pow(sige4,2);
float nume5 = pow(e-ce5,2); float dene5 = pow(sige5,2);

float Ue1 = exp(-(nume1)/(2*dene1));
float Ue2 = exp(-(nume2)/(2*dene2));
float Ue3 = exp(-(nume3)/(2*dene3));
float Ue4 = exp(-(nume4)/(2*dene4));
float Ue5 = exp(-(nume5)/(2*dene5));

// fuzzy set derror
float numde1 = pow(de-cde1,2); float dende1 = pow(sigde1,2);
float numde2 = pow(de-cde2,2); float dende2 = pow(sigde2,2);

```

```
float numde3 = pow(de-cde3,2); float dende3 = pow(sigde3,2);
float numde4 = pow(de-cde4,2); float dende4 = pow(sigde4,2);
float numde5 = pow(de-cde5,2); float dende5 = pow(sigde5,2);
```

```
float Ude1 = exp(-(numde1)/(2*dende1));
float Ude2 = exp(-(numde2)/(2*dende2));
float Ude3 = exp(-(numde3)/(2*dende3));
float Ude4 = exp(-(numde4)/(2*dende4));
float Ude5 = exp(-(numde5)/(2*dende5));
```

```
//-----Layer 2-----
```

```
//error * derror tb
```

```
float w1=Ue1*Ude1; float w2=Ue1*Ude2; float
w3=Ue1*Ude3; float w4=Ue1*Ude4; float w5=Ue1*Ude5;
float w6=Ue2*Ude1; float w7=Ue2*Ude2; float
w8=Ue2*Ude3; float w9=Ue2*Ude4; float w10=Ue2*Ude5;
float w11=Ue3*Ude1; float w12=Ue3*Ude2; float
w13=Ue3*Ude3; float w14=Ue3*Ude4; float w15=Ue3*Ude5;
float w16=Ue4*Ude1; float w17=Ue4*Ude2; float
w18=Ue4*Ude3; float w19=Ue4*Ude4; float w20=Ue4*Ude5;
float w21=Ue5*Ude1; float w22=Ue5*Ude2; float
w23=Ue5*Ude3; float w24=Ue5*Ude4; float w25=Ue5*Ude5;
```

```
//-----Layer 3-----
```

```
float
```

```
wtot=w1+w2+w3+w4+w5+w6+w7+w8+w9+w10+w11+w12+w
13+w14+w15+w16+w17+w18+w19+w20+w21+w22+w23+w24
+w25;
```

```
float wbar1=w1/wtot; float wbar6=w6/wtot; float
wbar11=w11/wtot; float wbar16=w16/wtot; float
wbar21=w21/wtot;
```

```
float wbar2=w2/wtot; float wbar7=w7/wtot; float
wbar12=w12/wtot; float wbar17=w17/wtot; float
wbar22=w22/wtot;
```

```

float wbar3=w3/wtot; float wbar8=w8/wtot; float
wbar13=w13/wtot; float wbar18=w18/wtot; float
wbar23=w23/wtot;
float wbar4=w4/wtot; float wbar9=w9/wtot; float
wbar14=w14/wtot; float wbar19=w19/wtot; float
wbar24=w24/wtot;
float wbar5=w5/wtot; float wbar10=w10/wtot; float
wbar15=w15/wtot; float wbar20=w20/wtot; float
wbar25=w25/wtot;

```

```

//-----Layer 4-----
//zero order f = constant
float f1= 2.798e-005;    float f11= -3.575e-006; float f21=
4.282e-006;
float f2= -0.0006443;    float f12= -0.07225; float f22=
0.0842;
float f3= -0.05019;    float f13= -0.02732; float f23= 0.01417;
float f4= 0.05311;    float f14= 0.02669; float f24= -0.01028;
float f5= 0.0005697;    float f15= -0.05613; float f25=
0.002296;
float f6= 3.629e-006;    float f16= -9.6e-007;
float f7= 0.001558;    float f17= -0.02135;
float f8= 0.1764;    float f18= -0.01883;
float f9= -0.192;    float f19= 0.02271;
float f10= -0.002624;    float f20= -0.02461;

float wbar1f1 = wbar1*f1;    float wbar11f11 = wbar11*f11;
float wbar21f21 = wbar21*f21;
float wbar2f2 = wbar2*f2;    float wbar12f12 = wbar12*f12;
float wbar22f22 = wbar22*f22;
float wbar3f3 = wbar3*f3;    float wbar13f13 = wbar13*f13;
float wbar23f23 = wbar23*f23;
float wbar4f4 = wbar4*f4;    float wbar14f14 = wbar14*f14;
float wbar24f24 = wbar24*f24;
float wbar5f5 = wbar5*f5;    float wbar15f15 = wbar15*f15;
float wbar25f25 = wbar25*f25;

```

```

float wbar6f6 = wbar6*f6;    float wbar16f16 = wbar16*f16;
float wbar7f7 = wbar7*f7;    float wbar17f17 = wbar17*f17;
float wbar8f8 = wbar8*f8;    float wbar18f18 = wbar18*f18;
float wbar9f9 = wbar9*f9;    float wbar19f19 = wbar19*f19;
float wbar10f10 = wbar10*f10; float wbar20f20 = wbar20*f20;

```

```
//-----Layer 5-----
```

```
//sum
```

```
output =
```

```

(wbar1f1+wbar2f2+wbar3f3+wbar4f4+wbar5f5+wbar6f6+wbar7
f7+wbar8f8+wbar9f9+wbar10f10+wbar11f11+wbar12f12+wbar1
3f13+wbar14f14+wbar15f15+wbar16f16+wbar17f17+wbar18f18
+wbar19f19+wbar20f20+wbar21f21+wbar22f22+wbar23f23+wb
ar24f24+wbar25f25);

```

```
D = output + output_last;
```

```
D = constrain(D,0,1);
```

```
PWM = range(D,0,1,0,255);
```

```
output_last = D;
```

```

pwmWrite(11, PWM); //write perturbed PWM value to PWM
hardware

```

```

while(c > 0){
  catat = millis();
  c--;
}

```

```
if((millis() - catat) >= cek2 || mulai2 == 1){
```

```
  Serial.print("DATA,TIME,");
```

```
  Serial.print(vmpp);
```

```
  Serial.print(",");
```

```
  Serial.print(panelVolts);
```

```
  Serial.print(",");
```

```
  Serial.print(current);
```

```
  Serial.print(",");
```

```

Serial.print(panelWatts);
Serial.print(",");
Serial.print(maxwatts);
Serial.print(",");
Serial.print(vtr);
Serial.print(",");
Serial.print(itr);
Serial.print(",");
Serial.print(daytr);
Serial.print(",");
Serial.print(vfx);
Serial.print(",");
Serial.print(ifx);
Serial.print(",");
Serial.print(dayfx);
Serial.print(",");
Serial.print(output);
Serial.print(",");
Serial.print(D);
Serial.print(",");
Serial.println(PWM);
c = 1;
mulai2 = 0;
}

delay(1);
}

//=====
//=====
//=====
//=====

void PWM_off(){
  pwmWrite(11, 0);
}

```

```

float range(float x, float in_min, float in_max, float out_min, float
out_max)
{
    return (x - in_min) * (out_max - out_min) / (in_max - in_min) +
out_min;
}

```

```

void setpoint(){
    while(b > 0){
        awal = millis();
        b--;
    }
}

```

```

if((millis() - awal) >= cek || mulai == 1){
    PWM_off();
    maxwatts = 0;
    delay(10);
    voc = 0;
    for(int i=0;i<10;i++){
        voc += ina219.getBusVoltage_V();
    }
    voc = voc/10;
    vmpp = voc*k;
    b = 1;
    mulai = 0;
    panelVolts = lastpanelVolts;
}
}

```

```

long readVcc() {
    // Read 1.1V reference against AVcc
    // set the reference to Vcc and the measurement to the internal
    1.1V reference
}

```



```

    #if defined(__AVR_ATmega32U4__) ||
    defined(__AVR_ATmega1280__) ||
    defined(__AVR_ATmega2560__)
        ADMUX = _BV(REFS0) | _BV(MUX4) | _BV(MUX3) |
        _BV(MUX2) | _BV(MUX1);
    #elif defined(__AVR_ATtiny24__) ||
    defined(__AVR_ATtiny44__) || defined(__AVR_ATtiny84__)
        ADMUX = _BV(MUX5) | _BV(MUX0);
    #else
        ADMUX = _BV(REFS0) | _BV(MUX3) | _BV(MUX2) |
        _BV(MUX1);
    #endif

    delay(2); // Wait for Vref to settle
    ADCSRA |= _BV(ADSC); // Start conversion
    while (bit_is_set(ADCSRA,ADSC)); // measuring

    uint8_t low = ADCL; // must read ADCL first - it then locks
    ADCH
    uint8_t high = ADCH; // unlocks both

    long result = (high<<8) | low;

    result = 1125300L / result; // Calculate Vcc (in mV); 1125300 =
    1.1*1023*1000
    return result; // Vcc in millivolts
}

```

***“Halaman ini memang dikosongkan”***

## BIODATA PENULIS



Aditya Isman Nugraha lahir di Cianjur pada tanggal 28 Juli 1993. Pendidikan penulis berawal dari SDN Ibu Dewi 4 Cianjur, SMPN 2 Cianjur, dan SMAN 1 Cianjur.

Setelah lulus SMA penulis melanjutkan pendidikan vokasi di Institut Teknologi Bandung (ITB) program studi D3 Metrologi dan Instrumentasi pada tahun 2011. Semasa kuliah vokasi, penulis aktif di kegiatan UKM Lingkung Seni Sunda (LSS) ITB dan kegiatan volunter luar kampus. Penulis kemudian melanjutkan jenjang S1 Lintas Jalur di Teknik Fisika ITS pada tahun 2014. Penulis dapat dihubungi melalui surat elektronik dengan alamat [adityaisman@gmail.com](mailto:adityaisman@gmail.com).

